

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO OSCILATORIO ALREDEDOR DE UN CILINDRO

Proyecto Fin de Carrera

Autor:

Daniel Martínez González

Tutor:

Wilfried Coenen

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

Leganés, Diciembre 2012

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia el apoyo recibido durante todos estos años, ya que sin su ayuda no habría podido realizar esta carrera.

Agradecer especialmente a mi tutor Wilfried Coenen, del departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, por la posibilidad de haber podido realizar este proyecto y por toda su atención, dedicación y ayuda recibida.

Agradecer a todos los compañeros que han estado conmigo a lo largo de estos años en los buenos y malos momentos.

Por último darle las gracias a mi novia Rebeca Vaca Rubiato por animarme y apoyarme en todo momento.

Resumen

El proyecto de fin de carrera que se presenta a continuación consiste en el estudio y demostración del fenómeno resultante del movimiento oscilatorio de un fluido alrededor de un cilindro, también llamado *Steady Streaming*, mediante la simulación con dos métodos numéricos distintos: ANSYS FLUENT y GERRIS.

Este fenómeno ha sido estudiado por muchos autores, utilizando diferentes experimentos y métodos numéricos para visualizar lo que ocurre alrededor del cilindro. En este documento se ha intentado demostrar la existencia de *Steady Streaming* en base a las características de este fenómeno: la existencia de un flujo promediado en el tiempo no nulo, la aparición de dos capas fluidas alrededor de la superficie cilíndrica donde el fluido se comporta de manera distinta (una capa de Stokes donde los esfuerzos viscosos son predominantes y una capa límite donde predominan los esfuerzos convectivos y que tiene un mayor espesor que la anterior), la visualización de la simetría que presenta el flujo en este tipo de problemas y la aparición de dos chorros eyectados en la dirección de oscilación debido al choque de las capas límites y de las ocho recirculaciones características (vórtices) que aparecen: cuatro dentro de la capa límite y cuatro más en los alrededores.

Hay dos parámetros que caracterizan el fluido en este tipo de movimientos, como lo son la frecuencia adimensional o inverso del número de Strouhal (ε) y el número de Reynolds Streaming (R_S). En este documento se van a estudiar los casos $\varepsilon \ll 1$ y $R_S \gg 1$; en particular $\varepsilon = 0.1, 0.2$ y $R_S = 40, 160$.

Los valores de los parámetros de estos casos han sido escogidos por que encajan con una línea de investigación del grupo de Mecánica de Fluidos de la universidad Carlos III de Madrid, en particular con la publicación llevada a cabo por parte de Wilfried Coenen titulada *Oscillatory flow about a cylinder pair* del año 2009.

El procedimiento para llevar a cabo las simulaciones consiste en crear las mallas necesarias, refinarlas y modelar los parámetros del problema necesarios para la simulación en ANSYS FLUENT. Posteriormente se realiza un post-procesamiento de los resultados obtenidos con el programa TecPlot 360. También se utiliza un código de simulación CFD libre llamado GERRIS (<http://gfs.sourceforge.net/>), como alternativa a ANSYS FLUENT con el que se obtienen imágenes y animaciones para tratar de visualizar este fenómeno. Por último se comparan los resultados obtenidos con los del resto de autores que lo han estudiado.

Índice

Agradecimientos	1
Resumen.....	2
Índice	3
1. Introducción	4
1.1. El fenómeno del <i>Steady Streaming</i>	4
1.2. Trabajos relacionados con el fenómeno	6
1.3. Aplicaciones del fenómeno	14
1.4. Simulación numérica	15
1.5. Objetivos	18
1.6. Coste Económico.....	18
2. Mallado, implementación del caso y post-procesamiento de datos	19
2.1. Introducción	19
2.2. Mallado	19
2.3. Refinado de la malla e implementación del caso	28
2.3.1 Refinado de la malla.....	30
2.3.2. Implementación del caso	33
2.4. Cálculo de líneas de corriente del flujo promediado	38
2.5. Post-procesamiento de datos.....	38
3. Alternativa: código de simulación GERRIS.....	40
4. Resultados.....	42
4.1. ANSYS FLUENT	42
4.1.1. Sendas (obtenidas en TecPlot360)	42
4.1.2. Flujo promediado	45
4.2. Gerris.....	51
4.2.1. Sendas	51
4.2.2. Flujo promediado	53
4.3. Comparación Ansys Fluent - Gerris.....	54
5. Conclusiones.....	55
5.1. Conclusiones generales.....	55
5.2 Líneas futuras de investigación.....	56
6. Bibliografía	57
7. Anexos	58
Anexo 1: UDF utilizada en ANSYS FLUENT para simular el movimiento oscilatorio del fluido	58
Anexo 2: UDF usada en ANSYS FLUENT para realizar el promedio de velocidades en un ciclo y visualizar las líneas de corriente del flujo promediado	58
Anexo 3: scm-file correspondiente a la anterior udf	59
Anexo 4: script utilizado para definir el problema en GERRIS	60

1. Introducción

1.1. El fenómeno del *Steady Streaming*

Cuando un flujo oscilatorio pasa alrededor de un cilindro circular, la interacción entre el flujo y el cilindro genera un campo fluido promediado en el tiempo no nulo alrededor del cilindro. Este fenómeno se conoce como *Steady Streaming*. Se genera un campo de vorticidad fluctuante dentro del cuerpo principal del fluido que tiene un promedio temporal no nulo.

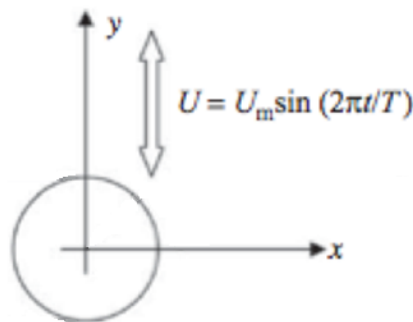


Figura 1: Esquema del problema.

Existen tres tipos de escalas de longitud asociadas a este tipo de problemas:

- $b = \frac{U_0}{w}$ que es una medida de la amplitud de la oscilación;
- $\delta = \left(\frac{\nu}{w}\right)^{\frac{1}{2}}$ que representa el grosor de la capa de Stokes presente en la superficie del cilindro;
- y una longitud geométrica a representativa de las dimensiones del cilindro: el radio.

Donde U_0 es la amplitud de la velocidad oscilatoria, w es la frecuencia de oscilación del flujo dada por $w=2\pi f$; siendo f la frecuencia de oscilación, y ν la viscosidad cinemática del fluido.

Con estas tres escalas de longitud se pueden construir dos parámetros adimensionales independientes representativos del movimiento de este tipo de problemas:

- Frecuencia adimensional, inverso del número de Strouhal (St) o número de Keulegan-Carpenter (KC):

$$\varepsilon = \frac{1}{St} = KC = \frac{b}{a} = \frac{U_0}{w \cdot a}$$

- Número de Reynolds característico del flujo promediado (o de *Steady Streaming*):

$$R_S = \frac{b^2}{\delta^2} = \frac{U_0^2}{w \cdot \nu} = \frac{\varepsilon \cdot U_0 \cdot a}{\nu}$$

La relación entre estos dos parámetros es:

$$R_S = \varepsilon \cdot Re$$

Este fenómeno, para el caso de $\varepsilon \ll 1$ y $R_S \gg 1$, se caracteriza por la aparición de dos capas de distintos grosores y características alrededor del cilindro:

- La capa de Stokes en el límite del sólido con condición de no deslizamiento, donde predominan los esfuerzos viscosos y que tiene un espesor de $O\left(\frac{\varepsilon \cdot a}{\sqrt{R_S}}\right)$.
- La capa límite donde predominan los esfuerzos convectivos y que cuenta con un mayor espesor que la capa de Stokes, de $O\left(\frac{a}{\sqrt{R_S}}\right)$.

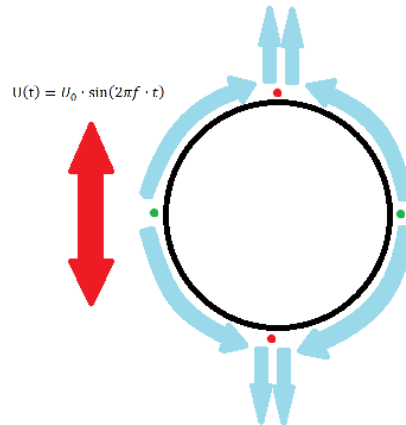


Figura 2: Esquema del problema de estudio, donde los puntos verdes representan los puntos de remanso y los puntos rojos los puntos de eyección.

En la capa de Stokes, los esfuerzos de Reynolds, cuyo promedio temporal no es nulo, generan un movimiento de *streaming*, que persiste fuera de esa capa. Para el caso de interés de este estudio, $R_S \gg 1$, ese movimiento de *streaming* fuera de la capa de Stokes está confinado en una estrecha capa límite. Allí, el movimiento se desarrolla desde dos puntos de remanso, hasta dos puntos de eyección. En los puntos de eyección los flujos que provienen de los dos distintos puntos de remanso se encuentran, dando lugar a un chorro que sale eyectado perpendicular a la superficie del cilindro.

El patrón característico del fenómeno *Steady Streaming* contiene 4 pequeñas zonas de recirculación dentro de la capa límite y otras cuatro zonas de recirculación más grandes fuera de la misma. Esta estructura de *Steady Streaming* es simétrica con respecto a los ejes x e y si el fluido lleva la dirección y el sentido de cualquiera de los ejes cartesianos.

1.2. Trabajos relacionados con el fenómeno

En 1954 Holtsmark, Johnsen, Sikkeland y Skavlem publicaron uno de los primeros artículos relacionados con el flujo cerca de un obstáculo cilíndrico en un fluido oscilatorio; en este trabajo se resolvían las ecuaciones de la capa límite para una pared plana por aproximaciones sucesivas y posteriormente aplicaban la solución a un cilindro circular. De sus experimentos se obtuvieron fotos como las siguientes:

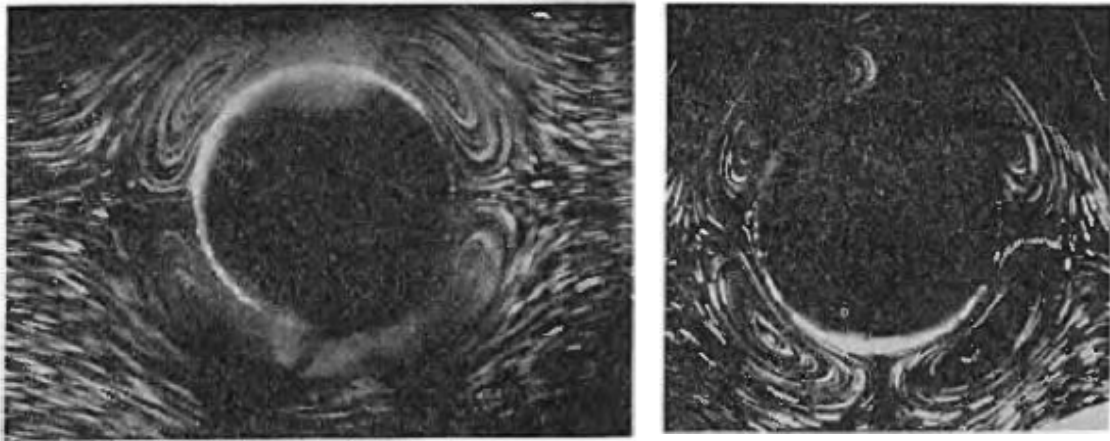


Figura 3: Fotos experimentales de *Steady Streaming* de Holtsmark & Johnsen & Sikkeland & Skavlem (1953).

En 1971 Davidson y Riley publicaron un artículo en el que se estudiaba el flujo inducido por un cilindro que realizaba vibraciones transversales periódicas en un fluido viscoso en reposo.

Para este experimento supusieron que $\varepsilon \ll 1$ con $R_S = O(1)$ y asumieron que los resultados eran asintóticamente válidos cuando $\varepsilon \rightarrow 0$ con $\lim(R_S) < \infty$. Para vibraciones de amplitud de velocidad pequeña la elección de ε como un parámetro de perturbación es obvia, mientras que la elección de R_S como el segundo parámetro independiente del problema no lo es tanto. Para el caso de un cilindro vibrando en un movimiento armónico simple, Stuart (1963) estableció que R_S es el número de Reynolds asociado con el fenómeno del *Steady Streaming*, investigado por Riley (1967).

Se comprobó que el *streaming* está conducido indirectamente desde dentro de la capa de Stokes, la cuál es una consecuencia directa de la acción de los esfuerzos de Reynolds; estos esfuerzos, para el caso puramente sinusoidal, no están presentes en la región externa.

Para el caso $Rs \gg 1$, pero con $\varepsilon Rs^{1/2} \ll 1$, el *streaming* externo asume una característica de capa límite, de grosor $O(Rs^{-1/2})$. Esta capa límite ha sido objeto de estudio por parte de Riley (1965) y Stuart (1966) para el caso de un cilindro vibrando de manera sinusoidal. En los casos en los que $Rs \gg 1$ el *streaming* externo asume el carácter de una capa límite con grosor de la capa límite externa de $O(Rs^{-1/2})$, del orden de $O(\varepsilon^{-1})$ veces más gruesa que la capa de Stokes. El trabajo de Riley (1965) y Stuart (1966) indica que estas capas límite desarrolladas desde los dos puntos de remanso continúan desarrollándose, llegando a una colisión inevitable, la cuál resulta en un delgado chorro que emerge a lo largo del eje de oscilación.

Para visualizar todo lo anterior Davidson y Riley realizaron una serie de experimentos cuyo objetivo principal era medir la fuerza del chorro que resulta de la colisión de las capas límite a lo largo del eje de oscilación. Lo lograron por medio de una técnica de visualización de flujo que se muestra en la siguiente imagen:

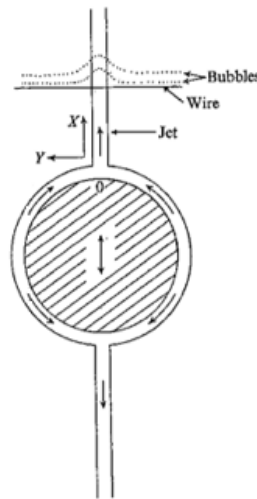


Figura 4: Esquema del experimento realizado por Davidson y Riley para la visualización chorro de fluido eyectado en 1971.

El cilindro vibrante era sumergido en un tanque de agua y oscilaba verticalmente. Se situaba un cable delgado atravesando el chorro, y por este cable una corriente de pulso era pasada para soltar líneas de burbujas de hidrógeno. Estas líneas de burbujas subían desde el cable y eran variadas por la corriente para mostrar la estructura del chorro claramente. Se realizaron medidas cuantitativas mediante las fotografías.

En 1994 Chang y Maxey realizaron el estudio de un fluido no estacionario alrededor de una esfera a valores bajos y moderados del número de Reynolds. Mediante simulaciones numéricas estudiaron el caso de flujo estacionario obteniendo resultados como los siguientes para comparar posteriormente con el caso de un flujo oscilatorio:

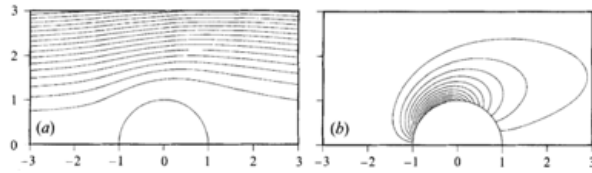


Figura 5: Flujo estacionario. (a) Líneas de corriente para $Re=10$. (b) Líneas de vorticidad constante para $Re=10$. Imagen obtenida del artículo *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1, Oscillatory motion* de Eugene J.Chang y Martin R.Maxey (1994).

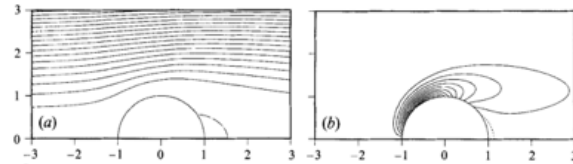


Figura 6: Flujo estacionario. (a) Líneas de corriente para $Re=40$. (b) Líneas de vorticidad constante para $Re=40$. Imagen obtenida del artículo *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1, Oscillatory motion* de Eugene J.Chang y Martin R.Maxey (1994).

Para el caso del flujo oscilatorio, el campo fluido externo sigue un movimiento puramente sinusoidal con promedio nulo. Mediante el método numérico utilizado obtuvieron una serie de fotos como las que se muestran a continuación en distintos momentos del ciclo:

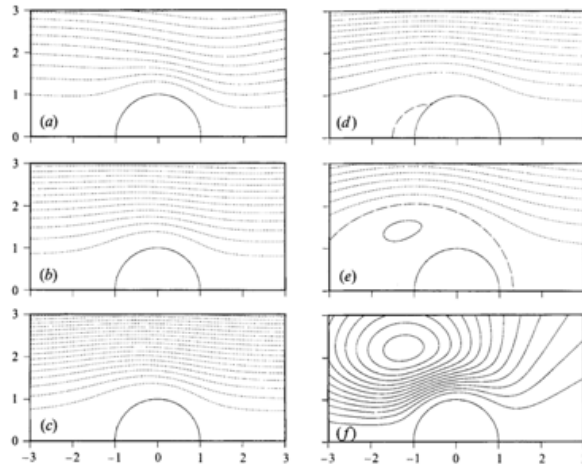


Figura 7: Patrones de líneas de corriente sobre medio ciclo de oscilación para $Re=16,7$ y $\varepsilon=1,6$ para $U(t)=-\sin(\phi)$. (a) $\phi=\pi/16$. (b) $\phi=\pi/4$. (c) $\phi=\pi/2$. (d) $\phi=3\pi/4$. (e) $\phi=15\pi/16$. (f) $\phi=\pi$. Imagen obtenida del artículo *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1, Oscillatory motion* de Eugene J.Chang y Martin R.Maxey (1994).

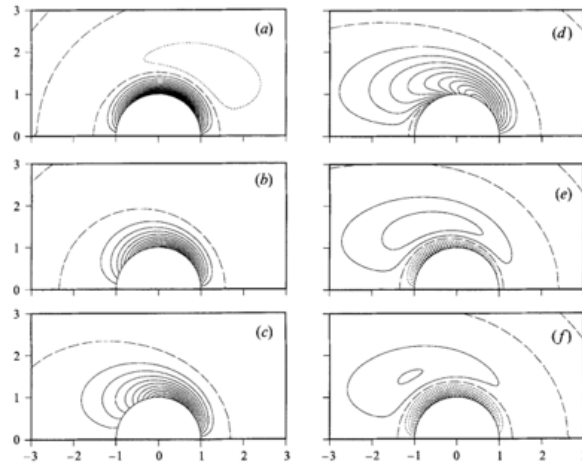


Figura 8: Contornos de vorticidad sobre media oscilación de un ciclo para $Re=16,7$ y $\varepsilon=1,6$. (a) $\phi=\pi/16$. (b) $\phi=\pi/4$. (c) $\phi=\pi/2$. (d) $\phi=3\pi/4$. (e) $\phi=15\pi/16$. (f) $\phi=\pi$. Imagen obtenida del artículo *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1, Oscillatory motion* de Eugene J.Chang y Martin R.Maxey (1994).

Pudieron observar claramente el fenómeno del *Steady Streaming*, que tiene una estructura típica de doble capa como la que se muestra en las siguientes imágenes:

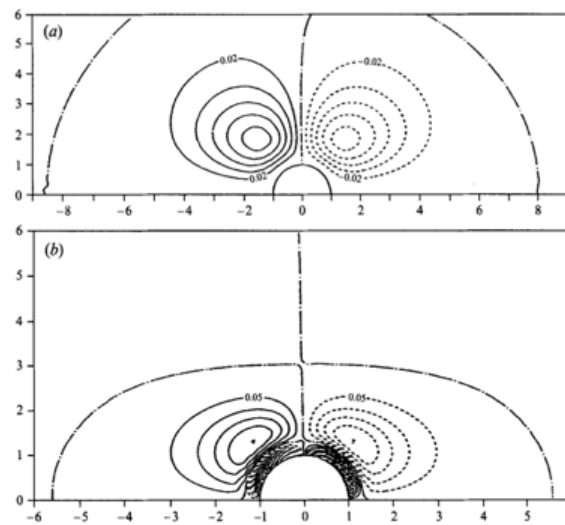


Figura 9: Patrones de *Steady Streaming* para $Re=16.7$ y $\varepsilon=1.6$. (a) Líneas de corriente para flujo promediado en el tiempo sobre un ciclo de oscilación. (b) Vorticidad promediada temporalmente sobre un ciclo de oscilación. Imagen obtenida del artículo *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1, Oscillatory motion* de Eugene J.Chang y Martin R.Maxey (1994).

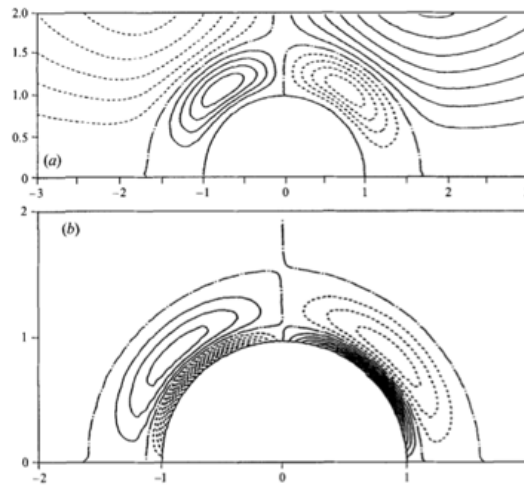


Figura 10: Patrones de *Steady Streaming* para $Re=16,7$ y $\varepsilon=0,1$. (a) Líneas de corriente para flujo promediado en el tiempo sobre un ciclo de oscilación. (b) Vorticidad promediada temporalmente sobre un ciclo de oscilación. Imagen obtenida del artículo *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1, Oscillatory motion* de Eugene J.Chang y Martin R.Maxey (1994).

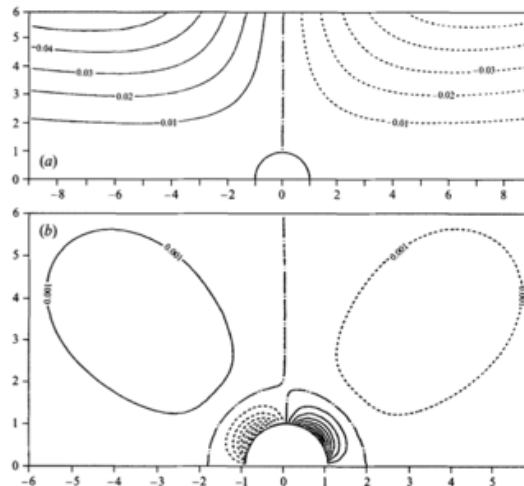


Figura 11: Patrones de *Steady Streaming* para $Re=0,1$ y $\varepsilon=1,6$. (a) Líneas de corriente para flujo promediado en el tiempo sobre un ciclo de oscilación. (b) Vorticidad promediada temporalmente sobre un ciclo de oscilación. Imagen obtenida del artículo *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1, Oscillatory motion* de Eugene J.Chang y Martin R.Maxey (1994).

Para un flujo estacionario la separación del fluido por regiones no ocurría para $Re \leq 20$; sin embargo esa separación de flujo es posible bajo ese número de Reynolds para flujo oscilatorio. La existencia de una región de separación es importante ya que actúa disminuyendo los esfuerzos viscosos sobre la esfera, en algunos casos la zona de recirculación del fluido era lo suficientemente grande para generar una fuerza negativa. Además disminuyendo las fuerzas viscosas, la burbuja de separación crea una asimetría en el flujo; las fases de aceleración y deceleración del ciclo de oscilación de la velocidad no son directamente opuestas y crean patrones de *streaming* independientes del tiempo.

Por otra parte en 1996 Wybrow, Yan y Riley publicaron un artículo sobre este fenómeno pero en este caso el cilindro se encontraba cercano a una pared.

Riley en 2001 publicó un artículo titulado *Steady Streaming* enfocado al campo de la Acústica. El término *streaming* es utilizado en acústica para describir el movimiento promediado en el tiempo que es inducido en un fluido dominado por sus componentes fluctuantes. Sin embargo, dicho término es engañoso por que implica un grado de compresibilidad del fluido, y muchos de los fenómenos *streaming* de interés están asociados con flujos incompresibles (ρ constante). Se utilizará el término de *Steady Streaming* como aquel que implica un flujo promediado temporalmente sobre la capa de Stokes y más allá de la misma. Empezó considerando el flujo inducido por una pequeña amplitud, fluctuando y con fuerzas no conservativas. Para $\varepsilon \ll 1$ esta fuerza no conservativa inestable genera, de manera artificial, un campo de vorticidad fluctuante dentro del cuerpo principal del fluido. Muchas investigaciones demuestran que el campo de vorticidad tiene un promedio temporal no nulo. Esto significa que el fenómeno del *Steady Streaming* es inducido en el principal cuerpo del fluido. El número de Reynolds se asume que es grande por lo que la viscosidad no toma parte en la generación del *Steady Streaming*. Para fluidos con viscosidad pequeña el flujo oscilatorio de orden principal en el seno del fluido es irrotacional. Esto es dentro de la capa de Stokes, en el límite del sólido se crea vorticidad donde la condición de no deslizamiento debe ser cumplida; la acción de los esfuerzos de Reynolds genera un *Steady Streaming* del orden $O(\varepsilon)$, el cual penetra al eje de esta capa para conducir un *streaming* de orden $O(\varepsilon)$ en el seno del fluido. El análisis del flujo externo a la capa de Stokes muestra que en el transporte de la vorticidad promediada temporalmente, la convección de vorticidad es efectuada por el promedio temporal Lagrangiano de la velocidad. Aunque el desarrollo teórico, resumido anteriormente, se ha centrado alrededor de una fuerza del cuerpo fluctuante, la teoría mantiene el origen en la base del flujo oscilatorio e irrotacional. Los flujos con *Steady Streaming* tratados han sido en un fluido homogéneo. Para flujos de superficies libres la situación puede ser marcadamente diferente. Ondas propagándose sobre la superficie libre de un líquido generan un flujo oscilatorio. Si el fluido es no viscoso la ecuación gobernante es lineal pero las condiciones cinemáticas y dinámicas en la superficie libre son no lineales. Un flujo promediado temporalmente, o flujo con *Steady Streaming*, puede ser por lo tanto también generado por un fluido no viscoso.

Extensas investigaciones sobre los flujos oscilatorios alrededor de un cilindro circular aislado bajo la condición de moderados y altos valores de KC fueron llevadas a cabo (Bearman 1985; Williamson 1985; Obasaju 1988; Justesen 1991). Seis regímenes de flujo fueron identificados gracias a los experimentos realizados por Williamson (1985) basados en las características de los vórtices generados en el rango de KC desde 2 hasta 40:

- $2 < KC < 4$: régimen simétrico sin generación de vórtice lejos del cilindro.
- $4 < KC < 7$: régimen asimétrico sin generación de vórtice lejos del cilindro.
- $7 < KC < 15$: régimen con generación de dos vórtices en cada periodo del flujo.
- $15 < KC < 24$: régimen con doble generación de dos vórtices en cada periodo del flujo.
- $24 < KC < 32$: régimen con triple generación de dos vórtices en cada periodo del flujo.
- $32 < KC < 40$: régimen con cuádruple generación de dos vórtices en cada periodo del flujo.

Los números KC críticos cambian levemente con el número de Reynolds (Sumer y Fredsøe 1997). El flujo oscilatorio alrededor de un cilindro circular es bidimensional sólo cuando el número de KC es más pequeño que un valor crítico, más allá del cual aparece la inestabilidad de Honji (inestabilidad tridimensional caracterizada por vórtices con estructuras con forma de seta generados en la dirección axial del cilindro (Honji 1981; Hall 1984; Sarpkaya 1986)). Por ejemplo, la inestabilidad de Honji fue observada a valores de $KC=1,0$ y $Re=1500$ por Sarpkaya (1986).

En 2009 Hongwei An, Liang Cheng y Ming Zhao publicaron un artículo sobre este fenómeno del *Steady Streaming*. En este artículo, un modelo de elementos finitos bidimensional era utilizado para simular el fenómeno del *Steady Streaming* alrededor de un cilindro circular bajo un flujo oscilatorio. A continuación se muestran diferentes resultados obtenidos en este artículo:

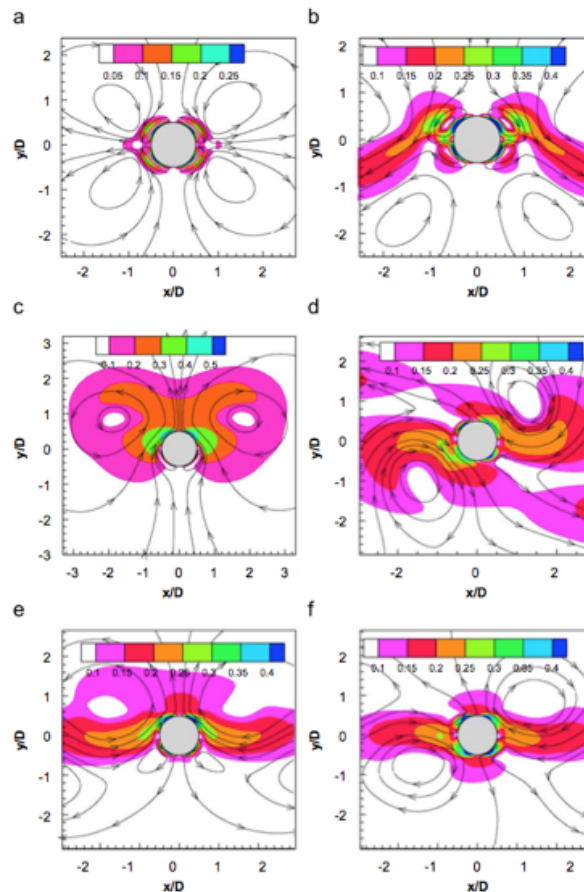


Figura 12: Líneas de corriente de la velocidad de *Steady Streaming* y contornos con la magnitud de la velocidad de *Steady Streaming* en seis regímenes distintos: (a) $\varepsilon=3.5$. (b) $\varepsilon=5$. (c) $\varepsilon=10$. (d) $\varepsilon=16$. (e) $\varepsilon=26$. (f) $\varepsilon=33$. Imagen obtenida del artículo *Steady Streaming around a circular cylinder in an oscillatory flow* de Hongwei An, Liang Cheng y Ming Zhao (2009).

Recientemente, en el 2010, Hongwei An, Liang Cheng y Ming Zhao publicaron un artículo titulado “Simulación numérica a bajos KC ” en el que tratan de explicar como el valor de KC afecta al espacio entre los vórtices vecinos. Se pretendía idealizar la interacción entre las olas y las estructuras cilíndricas en ingeniería offshore, caracterizándose por medio de dos parámetros: U_m que es la máxima velocidad del fluido (amplitud) y el periodo de oscilación T . Además de los

parámetros adimensionales comentados anteriormente (ε y Re), también definieron una frecuencia β dada por el ratio de Re y KC :

$$\beta = \frac{Re}{KC} = \frac{D^2}{\nu \cdot T}$$

siendo D el diámetro del cilindro y ν la viscosidad cinemática del fluido.

Se han realizado muchas investigaciones experimentales y numéricas de las estructuras del fluido y de las fuerzas hidrodinámicas que actúan en los alrededores de un cilindro con valores de KC de medios a altos, típicamente $O(1)$ - $O(10^2)$, (Maul & Milliner 1978; Bearman 1985; Williamson 1985; Obasaju, Bearman & Graham 1988; Justesen 1991; Lin, Bearman y Graham 1996; Saghafian 2003). Dichos valores de KC son relevantes para aplicaciones ingenieriles aunque los fluidos con KC más bajos han atraído también el interés significativamente debido a la rica variedad de fenómenos del flujo que se pueden presentar. Por ejemplo, Tatsuno & Bearman (1990) realizaron un estudio de visualización del fluido en flujos oscilatorios cuando $KC < 15$ y con frecuencias β de hasta 150. Identificaron 8 regímenes distintos del flujo mientras que β aumentaba desde cero. Exceptuando los dos órdenes de magnitud más bajos de β , el flujo es totalmente tridimensional y Tatsuno & Bearman (1990) encontraron que la longitud de onda de las estructuras del flujo en la dirección axial del cilindro varía entre uno y cinco diámetros del cilindro. Alguno de los regímenes de flujo observados por Tatsuno & Bearman han sido posteriormente reproducidos por modelos numéricos bidimensionales (Iliadis & Anagnostopoulos 1988; Dutsch 1998; Uzunoglu, Tan y Price 2001) y tridimensionales (Nehari, Armenio, & Ballio 2004; Elston, Blackburn & Sheridan 2006; Scandura, Armenio & Foti 2009). Hongwei An, Liang Cheng y Ming Zhao (2010) obtuvieron resultados como los que se muestran a continuación:

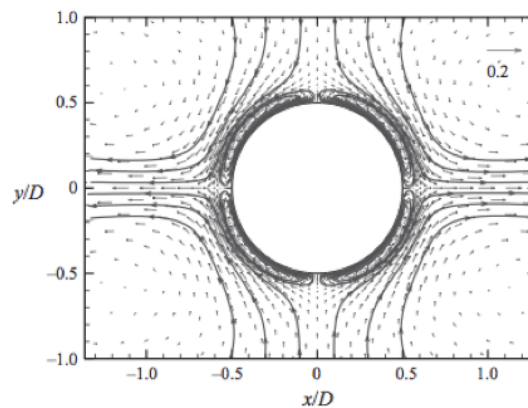


Figura 13: Líneas de corriente en el plano (x,y) del *Steady Streaming* correspondiente a $\varepsilon=2$ y $\beta=100$. Imagen obtenida del artículo *Direct numerical simulation of oscillatory flow around a circular cylinder at low Keulegan-Carpenter number* de Hongwei An, Liang Cheng y Ming Zhao (2010).

Como se puede ver en la imagen y tal y como se ha comentado anteriormente, el modelo de este fenómeno *Steady Streaming* se caracteriza por presentar cuatro pequeñas burbujas de recirculación fijadas al cilindro las cuales están rodeadas por otras cuatro burbujas de recirculación más grandes. El modelo

es simétrico con respecto a los ejes x e y . A frecuencias mas altas, esos vórtices son generados pero con un menor tamaño *para* no volverse inestables.

1.3. Aplicaciones del fenómeno

El estudio del fenómeno del Steady Streaming tiene aplicaciones en diversas áreas. Piercy & Lamb (1954) usaron haces ultrasónicos para medir los coeficientes de absorción de líquidos comunes. Un haz ultrasónico era dirigido directamente a lo largo de un tubo lleno de líquido, girado a varios ángulos, y absorbido. El flujo *streaming* unidireccional era desviado a un lado del tubo para su retorno. Hicieron medidas de la velocidad de *streaming* acústica en un haz para determinar la amplitud de la velocidad. Wu (1994) demostró que el calor generado por la incisión de un haz ultrasónico en el tejido óseo puede ser aliviado por *streaming* acústico en el líquido que lo rodea.

La técnica de levitación acústica ha alcanzado mucha importancia en los últimos años. Una fuente de sonido es posicionada en frente de un reflector. Si la onda de sonido resultante es suficientemente intensa entonces partículas pequeñas sólidas, o gotas de líquidos, pueden ser suspendidas. Con campos de sonido tan intensos los efectos de compresibilidad no pueden ser completamente ignorados. Estas técnicas pueden ser adaptadas para explicar este fenómeno, como Zhao (1999), Gopinath (2000), y Gopinath & Trinh (2000). Una aplicación reciente es para ver el crecimiento de cristales de proteína en la gravedad de la tierra (Chung & Trinh 1998). Una gota de solución proteínica se hace levitar electrostáticamente, mediante un levitador acústico situado horizontalmente. El *Steady Streaming* que se induce hace que la gota rote sobre el eje horizontal, con una lenta recirculación dentro de la misma. Condiciones asociadas con estos flujos promediados temporalmente son favorables para el crecimiento de cristales proteínicos macromoleculares, conveniente para rayos-X o cristalografía de neutrones.

En el proceso de audición, Lighthill (1991, 1992) sugiere que la naturaleza ha transformado el *Steady Streaming* en una ventaja. El movimiento de la cadena osicular (cadena de huesecillos del oído: martillo, yunque y estribo) produce ondas en el fluido coclear. El *streaming* asociado con estas ondas tiene un pico en una zona característica para una frecuencia en particular. Esto puede proporcionar el estímulo para los capilares internos de transformar señales acústicas en actividad neuronal. Otros flujos oscilatorios con implicaciones fisiológicas pueden ser considerados: Lyne (1971) analizó el flujo oscilatorio en un conducto curvado de sección transversal circular. Hall (1974) consideró el flujo a lo largo de un tubo con variación lenta de la sección transversal que se presenta cuando una diferencia de presión oscilatoria se mantiene a través de sus extremos. Motivados por el flujo en los pulmones durante la ventilación a alta frecuencia, Grotberg (1984) y Gaver & Grotberg (1986), estudiaron teórica y experimentalmente el flujo oscilatorio en un canal cónico bajo condiciones de volumen fijo y obtuvieron un *streaming* bidireccional en el canal. Goldberg (1999) también predijo *Steady Streaming*

bidireccional en su análisis del flujo oscilatorio en la región de entrada de un canal semi-infinito de sección transversal circular.

El fenómeno del *Steady Streaming* ha sido de interés en la ingeniería *offshore* donde está relacionado con la interacción entre las olas y las estructuras, transporte de sedimentos y limpieza o erosión de estructuras sumergidas *offshore*. Sumer y Fredsøe (2000) y Sumer (2005) demostraron que el mecanismo de limpieza de un rompeolas se debe a la acción del *Steady Streaming*. Sumer y Fredsøe (2001) reportaron que el fenómeno *Steady Streaming* era el mayor mecanismo fluido de limpieza por olas inducida alrededor de un gran cilindro vertical. Los sedimentos revueltos por las olas son llevados por el *Steady Streaming*, llevando a una erosión alrededor del cilindro. Liang y Cheng (2005) investigaron la limpieza de una tubería submarina inducida por las olas. Cuando las ondas de la superficie libre se propagan sobre una profundidad finita, el *Steady Streaming* causará transporte de sedimento si el lecho es móvil (Wybrow & Riley, 1996). Puede ser que tales procesos puedan afectar enterrando las tuberías del lecho marino. El transporte de sedimentos debido al *Steady Streaming* también puede ser el origen de las dunas marinas que se forman periódicamente a lo largo de la costa (Mei, 1985). Los trabajos teóricos (Yan & Riley, 1998) y experimentales (Chaplin, 1984) sobre las condiciones promediadas en el tiempo de un cilindro sumergido tienen aplicaciones para la estimación de los esfuerzos sobre los pontones sumergidos horizontalmente de las vigas de una plataforma marina.

Este fenómeno del *Steady Streaming* también tiene aplicaciones en el campo de la sonoluminiscencia: Longuet & Higgins (1998) estudiaron el *streaming* en una burbuja esférica experimentando simultáneamente oscilaciones de pequeña amplitud radiales y transversales, por el que una burbuja al colapsarse pueda emitir un pulso de luz. El ratio de crecimiento de burbujas en un campo sonoro, por el proceso de difusión rectificada, es influenciado por la presencia de *streaming* acústico. Esto se confirma por medio de los estudios de Davidson (1971), que muestra que el transporte de gas a través de la interfaz de una burbuja que conserva sus dimensiones esféricas por ondas de sonido planas, puede ser aumentado notablemente por el *streaming* inducido.

1.4. Simulación numérica

Las ecuaciones que describen un fluido en movimiento se pueden deducir de la ley de conservación de la masa y de la ley de conservación de la cantidad de movimiento. Aplicando estas leyes de conservación a un elemento fluido se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes. Simplificadas para un fluido incompresible (la densidad ρ es constante) son:

Continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Cantidad de movimiento:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v}$$

Donde ρ es la densidad y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Resolviendo estas ecuaciones se halla la velocidad del fluido (\vec{v}) y la presión (P) en cualquier punto del dominio estudiado.

Como se puede comprobar, son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que sólo en problemas con geometría y condiciones de contorno sencillas pueden ser resueltas de forma analítica. Estas ecuaciones pueden ser resueltas por métodos numéricos, con ayuda del ordenador.

Para que un ordenador pueda resolver las ecuaciones que describen el movimiento del fluido, estas han de ser transformadas en expresiones algebraicas que solo contengan números combinados mediante operaciones sencillas tales como sumar, restar y multiplicar

La transformación de las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico es lo que se llama proceso de discretización numérica. Hay varias técnicas de discretización, dependiendo de los principios en que se basen. Las más usadas son: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Aquí se describe brevemente el método de los volúmenes finitos, que es el utilizado por el programa ANSYS FLUENT y GERRIS.

Este método consiste fundamentalmente en convertir las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico mediante una transformación física de las ecuaciones. Por ejemplo, la ecuación de la cantidad de movimiento puede ser considerada como una serie de flujos dentro de un volumen fluido, junto con un término de fuente que es el gradiente de presiones.

Para mostrar la discretización se crean volúmenes finitos (particiones del espacio) en la dirección x , y se fija la atención en el volumen n -ésimo por simplicidad. En la figura se puede ver un volumen finito, o celda, típico donde el centro del volumen, punto P , es el punto de referencia en el que se quiere hallar el análogo numérico de la ecuación diferencial. Los puntos centrales de las celdas vecinas se denominan W y E (celda oeste y celda este). Las caras que delimitan la celda a un lado y a otro se denominan w y e (cara oeste y cara este).

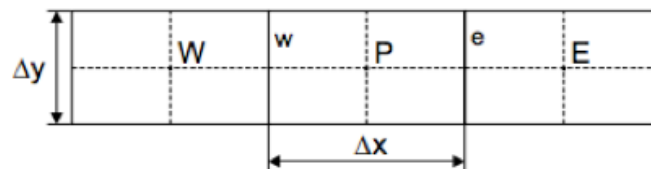


Figura 14: Esquema explicativo del método de Volúmenes Finitos.

Supóngase que se quiere discretizar la derivada segunda siguiente:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

Hay que hacerlo a partir de las derivadas primeras en las caras que limitan la celda:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_p = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_e} - \frac{\partial U}{\partial x_w}\right)}{x_e - x_w}$$

Estas derivadas se calculan, a su vez, a partir de los valores de la variable U en los centros de las celdas vecinas:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_e = \frac{U_E - U_P}{x_E - x_P}$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_w = \frac{U_P - U_W}{x_P - x_W}$$

Estas expresiones son utilizadas para implementar las derivadas de las ecuaciones en una celda cualquiera. De esta manera se puede hallar el análogo numérico de las ecuaciones diferenciales para cada volumen finito y después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas que resulta. De la misma manera, pueden introducirse las condiciones de contorno, añadiendo términos fuente en las ecuaciones de las celdas correspondientes.

El sistema de coordenadas cartesianas está fijado en el centro del cilindro y el eje x es perpendicular a la dirección del flujo. Una malla bidimensional de dominio circular con un radio de valor 11 veces el del radio de cilindro (ya que se han realizado pruebas con mallas de diferentes radios y se ha obtenido que este radio de la malla es suficiente para visualizar el fenómeno), con eje del cilindro localizado en el centro de la misma, es usada para simular el flujo oscilatorio alrededor del mismo. Se ha escogido esta distancia radial de la malla para poder visualizar sin problemas el fenómeno de *Steady Streaming* en las simulaciones, puesto que hacerla mas grande sería innecesario ya que incrementaría el tiempo computacional y no nos aportaría nada de información.



Figura 15: Esquema de un cilindro seccionado transversalmente por una malla plana circular.

1.5. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en demostrar, mediante métodos numéricos distintos a los utilizados hasta el momento (como lo son ANSYS FLUENT y GERRIS), la existencia del fenómeno llamado *Steady Streaming* en los flujos oscilatorios identificando sus características principales anteriormente explicadas.

Un objetivo secundario es la redacción de un tutorial de creación de mallas bidimensionales mediante ANSYS Workbench y un tutorial de refinado de mallas e implementación de casos de flujo oscilatorio en ANSYS FLUENT.

Este proyecto también sirve como paso previo antes de realizar el estudio de un fluido oscilatorio alrededor de dos cilindros.

1.6. Coste Económico

El proyecto se ha llevado a cabo utilizando los recursos de *software* y *hardware* proporcionados por la Universidad Carlos III de Leganés; por lo que el coste económico del proyecto es nulo.

Sin embargo, los recursos de *software* y *hardware* utilizados tienen un coste que se va a estimar de una manera aproximada a continuación:

HARDWARE	COSTE APROXIMADO (€)
Ordenador (PC)	1000

Tabla 1: Tabla de costes de Hardware.

SOFTWARE	COSTE APROXIMADO (€)	
	SOFTWARE STANDARD	LICENCIA Y ACTUALIZACIONES (ANUAL)
ANSYS CFD	30000	5500
ANSYS DESIGN MODELER	4400	850
TECPLOT 360	2400	
GERRIS	0	

Tabla 2: Tabla de costes de Software.

El presupuesto total de este proyecto es difícil de calcular, pero con los datos proporcionados en las tablas anteriores ascendería a la cantidad de 44150 €, que es irreal y sobredimensionada, ya que las licencias que se proporcionan con en estos tipos de *software* se usan para realizar todas las líneas de investigación del grupo de Mecánica de Fluidos de la universidad Carlos III de Madrid. Por lo tanto es difícil estimar la parte proporcional necesaria para la realización de este proyecto.

2. Mallado, implementación del caso y post-procesamiento de datos

2.1. Introducción

Para el desarrollo de esta parte del proyecto se han utilizado dos tipos de *software*: ANSYS FLUENT (versión 12.1.2), que es *software* de simulación en CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para ingeniería incluido en el paquete de software de ANSYS, utilizado para la creación de las mallas y la simulación de los distintos casos; y el software de visualización CFD TecPlot 360 para el post procesado de los datos obtenidos mediante ANSYS FLUENT.

También se ha necesitado de conocimiento del lenguaje C para utilizar scripts: uno que simule el comportamiento sinusoidal de la velocidad del flujo y otro que realice promedios temporales de la velocidad para la visualización de las líneas de corriente promediadas. Estos scripts en lenguaje C se han usado como UDF (*User Defined Function*) en ANSYS FLUENT.

Este apartado se ha redactado a modo de tutorial para futuras investigaciones relacionadas con este tipo de problemas.

2.2. Mallado

Para simular estos experimentos se han creado mallas de dominio circular con una disposición geométrica interior determinada para adaptarlas lo mejor posible al cilindro, de tal manera que se pueda estudiar con claridad lo que sucede en los alrededores del mismo y que exista continuidad en el tamaño de las celdas (se requiere más precisión y por lo tanto celdas más pequeñas cerca de la superficie cilíndrica para poder distinguir la capa límite, mientras que lejos del cilindro el tamaño de las celdas realmente no influye en los resultados). Además de la geometría del problema a estudio, se han tenido en cuenta las posibilidades del programa mediante el cual se realiza la malla, que en este caso es *ANSYS Design Modeler*.

Los pasos seguidos para la realización de las mallas se detallan a continuación:

1. Al abrir el programa *ANSYS Workbench* se elige la opción *Fluid Flow* en *Analysis systems*. Cuando aparece el recuadro con las características del nuevo proyecto se elige la primera opción llamada *Geometry*, mediante la cual se accede al generador de mallas: *ANSYS Design Modeler*.

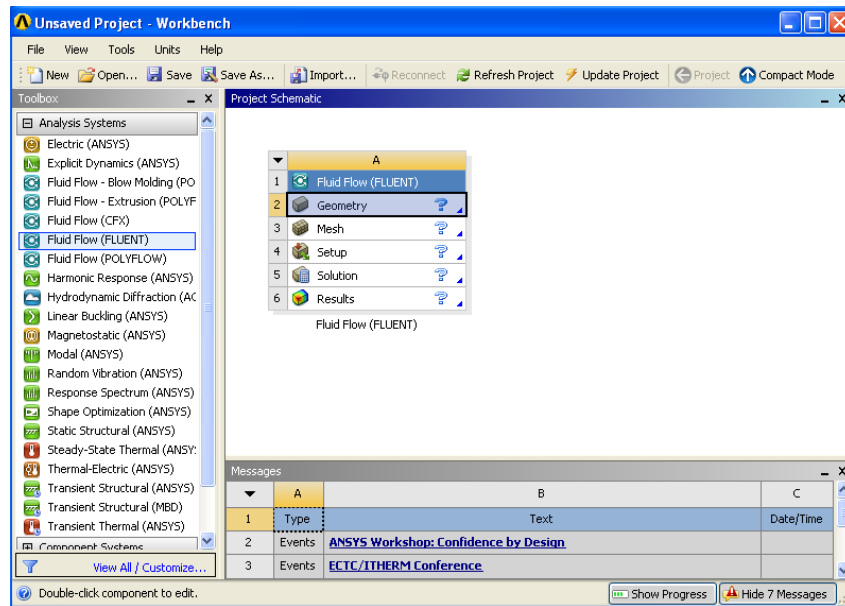


Figura 16: Pantalla principal de ANSYS WORKBENCH.

- Al iniciar *ANSYS Design Modeler* aparece una ventana que permite elegir las unidades de longitud que se establecerán en el editor gráfico por defecto: se eligen centímetros (cm), ya que el radio del cilindro a estudio se ha decidido que sea de 1 cm. También se cambian en el apartado *Settings* de la pestaña *Sketching* las siguientes opciones para facilitar el diseño de la malla:

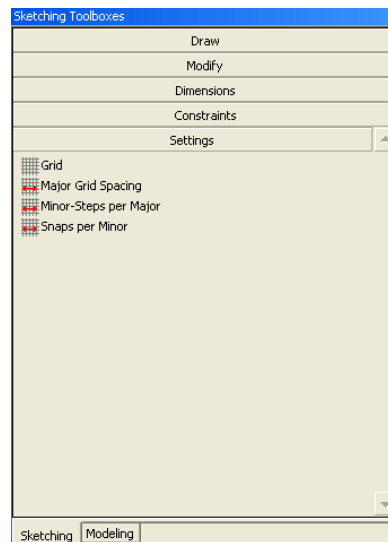


Figura 17: Apartado *Settings* de pestaña *Sketching*.

- Grid*: marcar las casillas *Show in 2D* (malla bidimensional, coordenadas cartesianas (x,y)) y *Snap* (saltos del cursor: posicionamiento automático en los vértices de las celdas cuadradas).
- Major Grid Spacing*: 1 cm (cuadrícula con celdas cuadradas de 1 cm de lado).
- Minor-Steps per Major*: 1.

-*Snaps per Minor*: 1 (el cursor se mueve saltando de celda a celda, es decir, se posiciona centímetro a centímetro).

3. Una vez cambiados los valores anteriores se procederá con el diseño gráfico: en la pestaña *Modelling* situando el cursor encima de *XY Plane* se selecciona el botón *New Sketch* y se vuelve a la pestaña *Sketching* para seleccionar del cuadro de herramientas la opción *Draw*. Aquí se pueden elegir todo tipo de figuras geométricas y herramientas de expresión gráfica para obtener el diseño deseado.

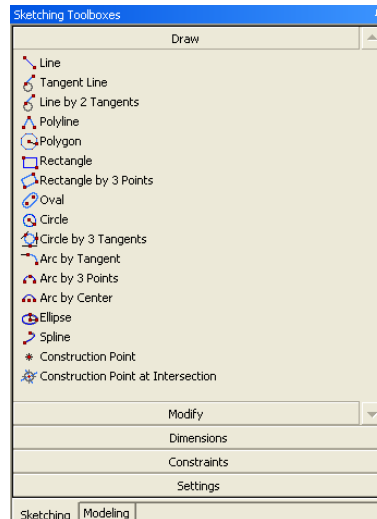


Figura 18: Apartado *Draw* de pestaña *Sketching*.

Primeramente se dibuja una circunferencia de 1 cm de radio con centro en el eje de coordenadas cartesianas para representar el cilindro y posteriormente se dibuja otra circunferencia mayor y concéntrica al cilindro anterior de 11 cm de radio que representa el dominio circular de la malla donde va a moverse el fluido (seleccionar opción *Circle*). Seguidamente se dibujan dos líneas rectas verticales que salgan desde la superficie del cilindro hasta tocar por arriba y por abajo el dominio circular de la malla tal y como muestra la imagen (seleccionar opción *Line*):

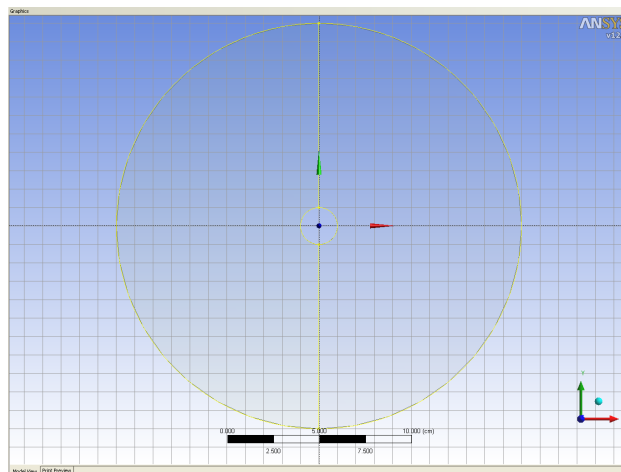


Figura 19: Esquema de las líneas utilizadas para el dibujo de la malla.

4. Una vez se tiene el esquema de la malla, tal y como se puede observar en la figura anterior, se tiene que seleccionar el botón *Concept* del menú principal, se elige la opción *Lines From Sketches*, se selecciona el *sketch* que se haya creado anteriormente del esquema (*Tree Outline*) y en la ventana *Details View* se aplica todo lo anterior dando al botón *Apply* para, en último lugar, generar las líneas pulsando el botón del menú *Generate*: esto hace que el *sketch* en conjunto se desagrupe y se pueda trabajar con todas las líneas que lo componen por separado para crear superficies como se verá en el siguiente paso, creándose un *Line Body* como se muestra en la siguiente imagen:

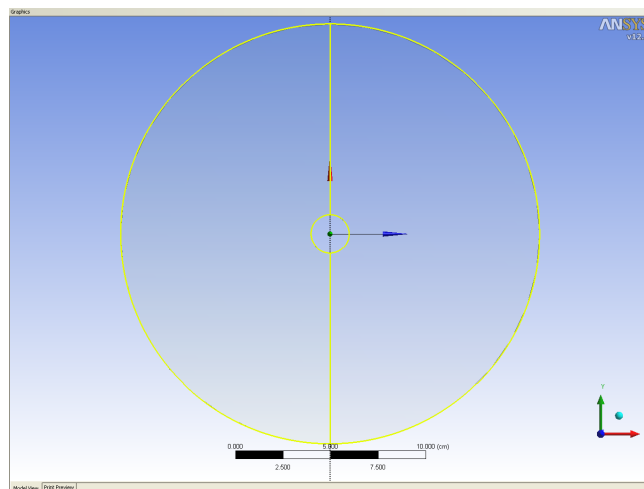


Figura 20: Creación del *Line Body* a partir del esquema dibujado.

5. Ahora que se han generado las líneas del *sketch*, vamos a crear superficies dentro del mismo. Para ello se va al menú principal, se selecciona el botón *Concept* y dentro del mismo se elige la opción *Surfaces From Edges*. Esto se hace para crear superficies con las líneas generadas anteriormente en el *sketch*. Presionando la tecla *CTRL* y seleccionando las líneas con las que se quiera formar cada superficie, se generan las dos superficies interiores del *sketch* (excepto el interior de la circunferencia, ya que esa sección es sólida, por esa zona no circula fluido y por lo tanto no se malla), creándose dos *Surface Bodies*. Se deberá cambiar el tipo de material de todas las superficies interiores y definir que son un fluido (*Fluid*) en la ventana *Details of Body*.

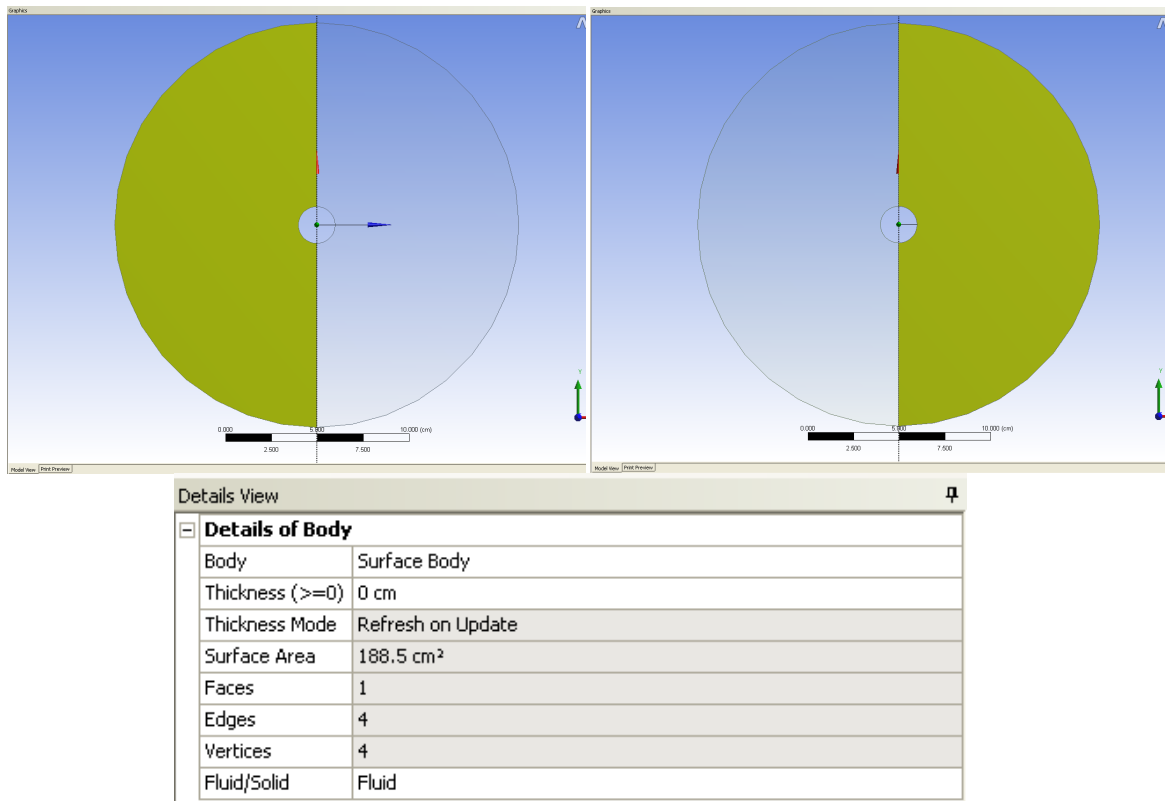


Figura 21: Superficies de la malla y detalles.

- Una vez hecho esto, se puede comprobar como en el esquema (*Tree Outline*) se han generado varios cuerpos. Se debe suprimir el *Line Body* creado seleccionándolo en el esquema con el botón derecho y eligiendo la opción *Supress Body* (ya que no hace falta para el mallado); y agrupar los *Surface Bodies* creados, seleccionándolos todos en el esquema, presionando el botón derecho del ratón y eligiendo la opción *Form a New Part*. El esquema por lo tanto queda de la siguiente manera:

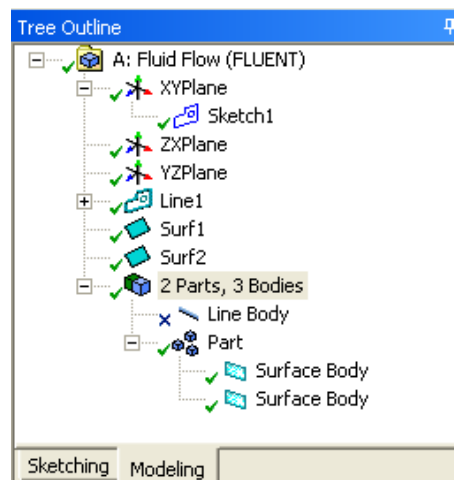


Figura 22: Esquema de elementos de la malla.

7. Una vez hecho todo lo anterior, se vuelve a la ventana principal de *ANSYS Workbench* para finalizar el proceso de generación de la malla. Se sitúa el cursor sobre el recuadro de nuestro proyecto y dentro del mismo, en la opción *Mesh*, pinchando con el botón derecho del ratón se elige la opción *Edit*.

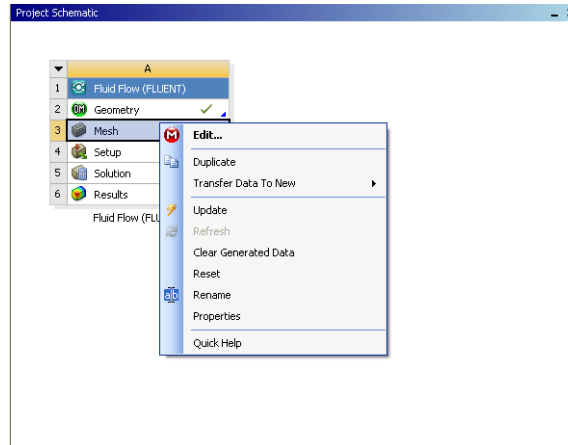


Figura 23: Generación de la malla en WORKBENCH previa geometría completada.

8. Una vez abierta la nueva ventana comprobar que en el panel de opciones de mallado están las siguientes marcadas como se muestra a continuación y pulsar el botón *OK*:
- *Physics preference*: marcar la casilla que indica *CFD (Computational Fluids Dynamics)* que es el conjunto de algoritmos y de métodos numéricos que se utilizarán para analizar y resolver las variables buscadas del fluido en este caso.
 - *Meshing Method*: marcar la casilla llamada *Automatic*, para que una vez indicado el espaciamiento entre nodos se genere el mallado automáticamente.
9. Para empezar a hacer la malla se darán primeramente los nombres a las líneas que forman el contorno exterior del dominio circular (*inlet*) y al cilindro (*cylinder*). Para ello se pulsa el botón que permite seleccionar ejes;



Figura 24: Barra de herramientas de selección: ejes.

y manteniendo pulsada la tecla *CTRL* seleccionar las líneas que se quieren nombrar y luego haciendo click derecho sobre alguna de las líneas seleccionadas se elige la opción *Create Named Selection* para introducir el nombre y aplicar finalmente los cambios realizados.

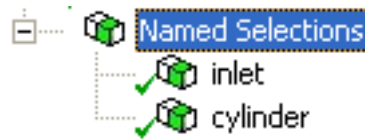


Figura 25: Nombres de las partes de la malla.

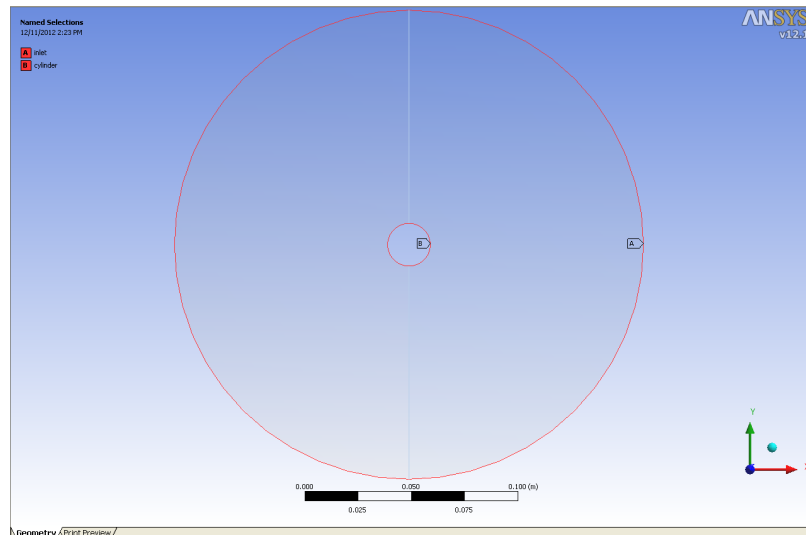


Figura 26: Visualización de las partes nombradas de la malla.

- Posteriormente se hace click derecho en el esquema sobre el apartado *Mesh* y se selecciona la opción *Insert > Sizing* para elegir el espaciado entre los nodos en los que dividiremos los ejes.

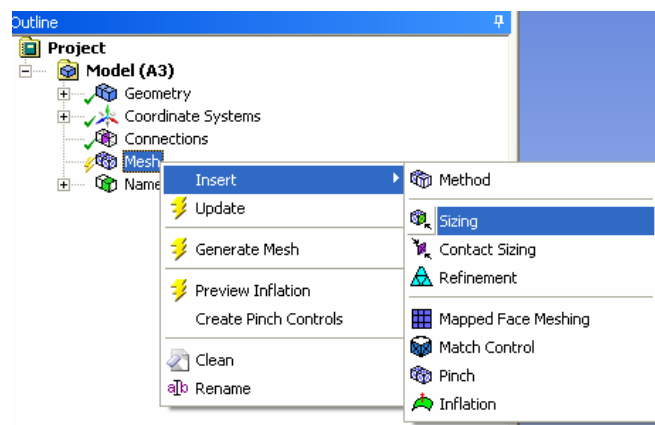


Figura 27: Menú de inserción de nodos en los ejes.

Se cambia el filtro de selección geométrica a *Edges* y se crean el número de *Edge Sizing* necesarios, que en este caso son dos: uno para las cuatro semicircunferencias (dos del cilindro y dos del contorno externo circular de la malla) y otro para las dos líneas verticales que parten del cilindro y acaban en el contorno exterior de la malla (ya que cada *Edge Sizing* lo usamos para agrupar los ejes con mismo número de divisiones, mismo *Bias Type* y mismo *Bias Factor*, que son propiedades utilizadas para definir el espaciamiento progresivo entre nodos).

A continuación se muestran los dos tipos de *Edge Sizing* aplicados a nuestra malla:

- Edge Sizing 1:

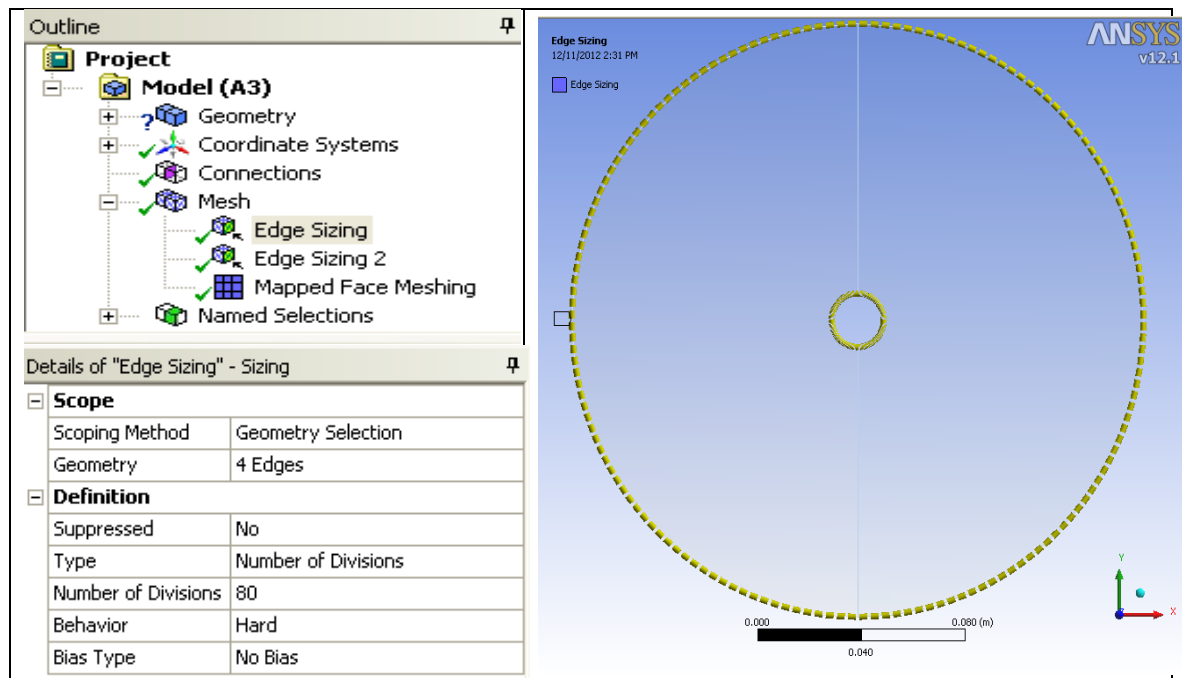


Figura 28: Detalles del espaciamiento circular.

- Edge Sizing 2:

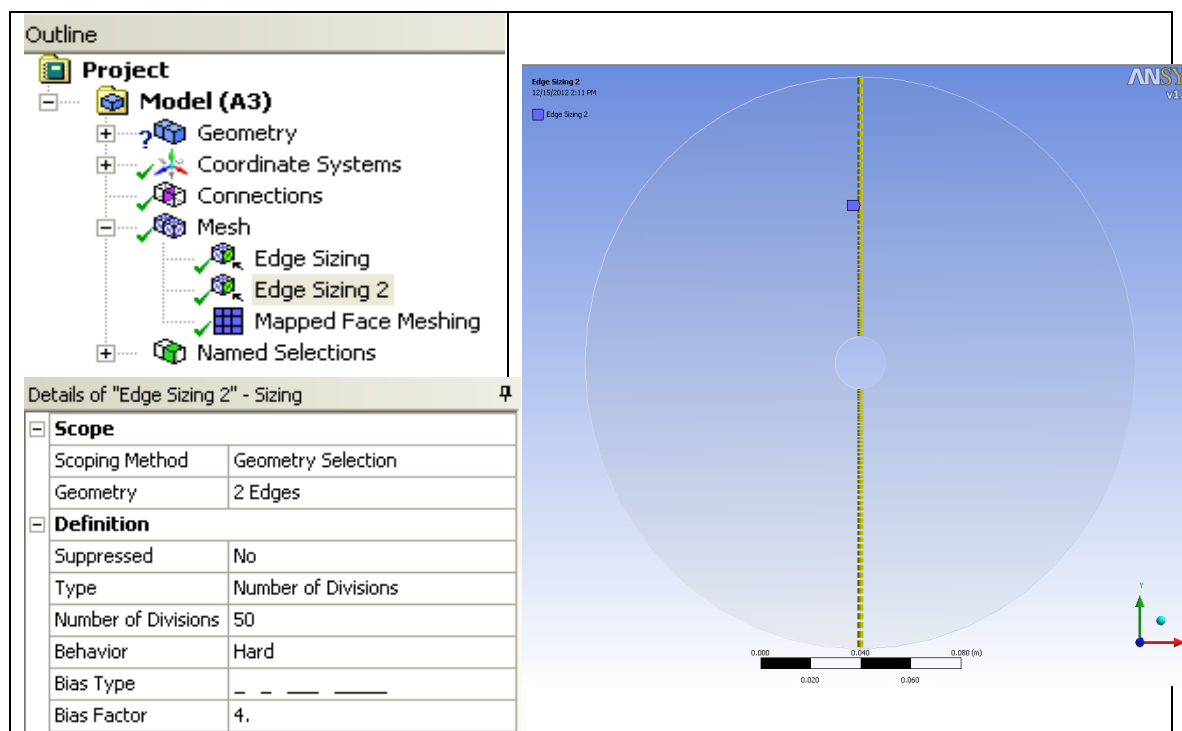


Figura 29: Detalles del espaciamiento lineal.

11. Una vez hecho todo lo anterior se debe hacer click derecho sobre *Mesh* en el esquema superior izquierdo y seleccionar *Insert Mapped Face Meshing*.

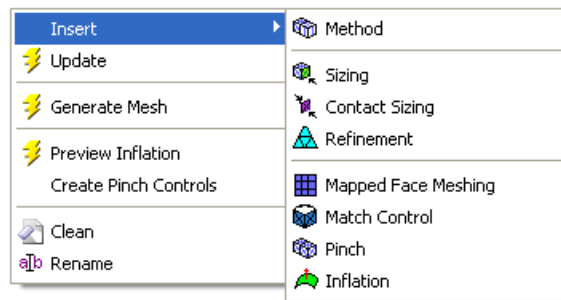


Figura 30: Mapeado de las superficies de mallado.

Posteriormente seleccionar todas las superficies que forman la malla: se elige la opción de selección de superficies (*Faces*) y la herramienta de selección *Box Select* para seleccionar toda la malla en conjunto (2 superficies para mallar).

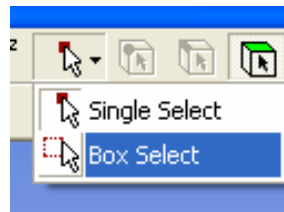


Figura 31: Barra de herramientas de selección.

En el recuadro de la parte inferior izquierda (*Details of Mapped Face Meshing*) se debe dejar marcada la opción *Quadrilaterals* en el apartado *Definition* > *Method*, ya que queremos que nos genere celdas cuadriláteras; y para aplicar todo lo anterior se pulsa el botón *Apply* del apartado *Geometry*.

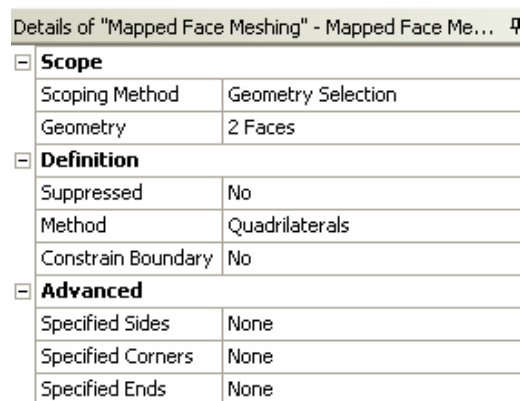


Figura 32: Cuadro con detalles del mallado.

Finalmente se hace click derecho sobre *Mesh* en el esquema y se pulsa *Generate Mesh* para finalizar el proceso de generación de la malla.

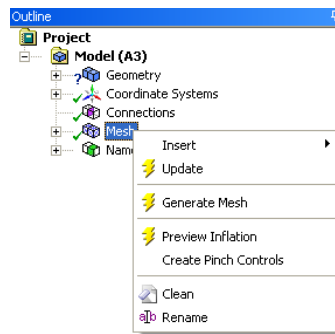


Figura 33: Opción de generación de la malla.

La malla que se genera tiene el siguiente aspecto:

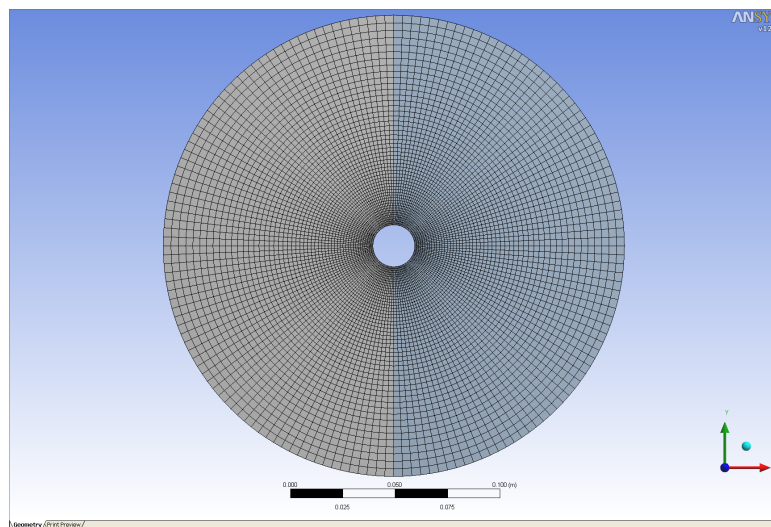


Figura 34: Malla generada.

Una vez generada la malla se debe guardar y cambiar a formato *.msh* haciendo click en *File/Export* para que el archivo generado por *Workbench* sea capaz de ser abierto y leído por ANSYS FLUENT.

2.3. Refinado de la malla e implementación del caso

Al abrir ANSYS FLUENT aparece una ventana (*FLUENT Launcher*) como la que se muestra a continuación:

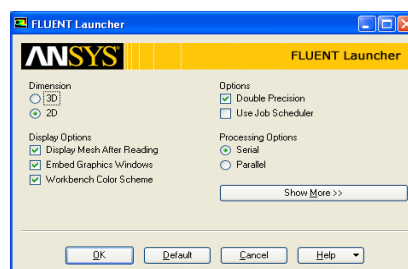


Figura 35: Ventana inicial de ANSYS FLUENT.

Se seleccionan las opciones mostradas en la imagen:

- *Dimension: 2D* ya que estamos trabajando con una malla bidimensional.
- *Options: Double Precision* para que los números decimales tengan 64 bits en vez de 32 bits, es decir, mayor precisión en los datos calculados que se traduce en un mayor tiempo de cálculo.
- *Display Options*: se dejan marcadas todas las casillas presentes en este apartado referentes a opciones visuales del programa.
- *Processing Options*: en función del número de procesadores disponibles en el ordenador en el que se este ejecutando el programa; para un único procesador se debe elegir la opción *Serial* y para varios procesadores elegir *Parallel* para disminuir el tiempo de cálculo.

Una vez se aceptan las opciones de la ventana anterior se abrirá ANSYS FLUENT. Para abrir la malla creada seleccionar: *File / Read / Mesh*, y elegir el nombre del archivo de la malla deseada con extensión *.msh* en el directorio en el que se haya guardado:

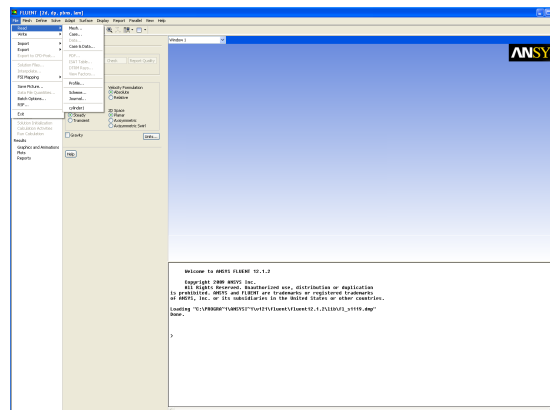


Figura 36: Perspectiva general de la pantalla de trabajo de ANSYS FLUENT.

La malla refinada que se va a utilizar en este caso es la siguiente:

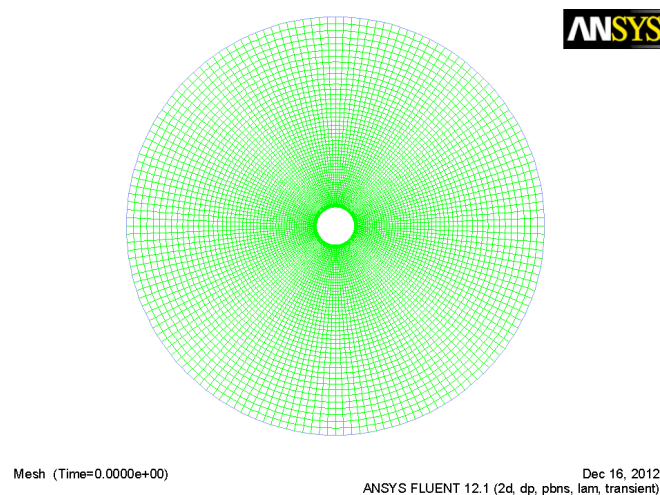


Figura 37: Vista global de la malla.

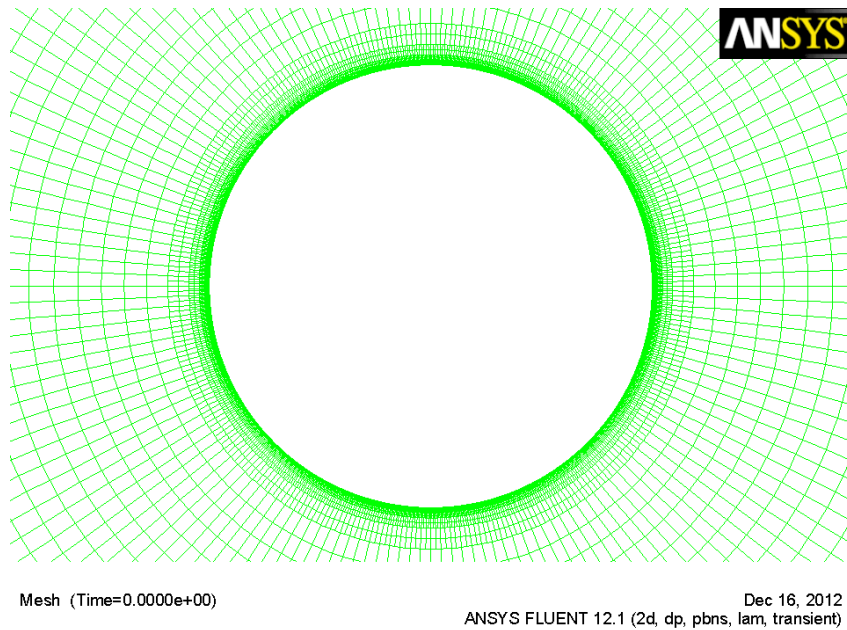


Figura 38: Zoom de la superficie cilíndrica.

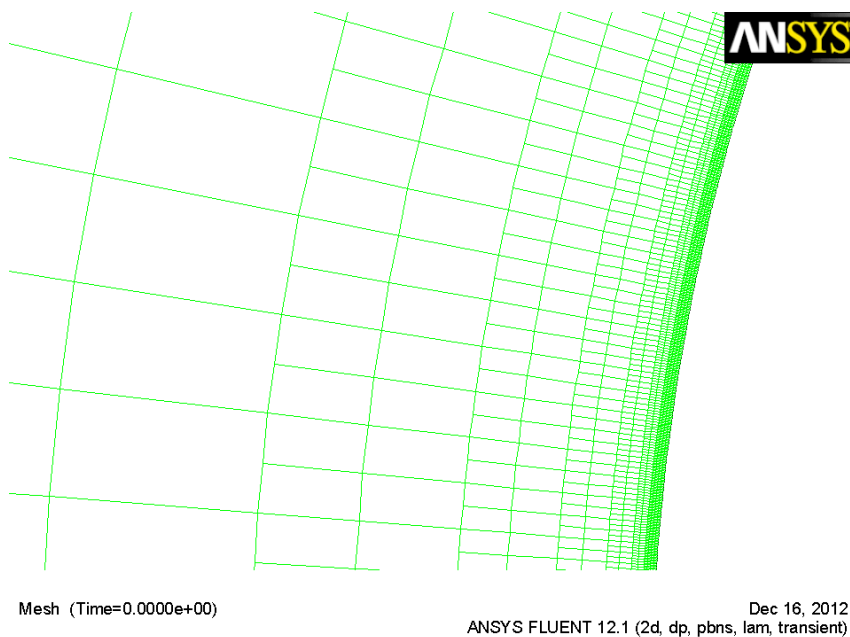


Figura 39: Detalle del refinado próximo a la superficie cilíndrica.

A continuación se explica el proceso de obtención de la malla refinada:

2.3.1 Refinado de la malla

Una vez abierta la malla original realizada en Workbench se debe chequear para comprobar el número de nodos existentes y si hay errores en la misma eligiendo la opción: *Mesh / Check*.

Mesh

Dec 16, 2012
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, lam)

Figura 40: Malla original sin refinar.

El tiempo de simulación del problema depende del número de nodos de la malla, por lo que se tiene que hacer un refinado en las zonas próximas a los cilindros para obtener una mayor precisión de cálculo en las zonas que nos interesan intentando también evitar un número excesivo de celdas.

Se sabe que los espesores de las capas características del fenómeno son:

- Capa de Stokes con espesor de $O\left(\frac{\varepsilon \cdot a}{\sqrt{Rs}}\right)$.
- Capa límite con espesor de $O\left(\frac{a}{\sqrt{Rs}}\right)$.

Como el tipo de problema requiere refinar en la superficie del cilindro para intentar visualizar la capa de Stokes (la más fina), en las simulaciones se va a intentar mediante el refinado obtener al menos 10 celdas en esta capa, por lo tanto, el espesor mínimo de las celdas en esta parte de la malla se quiere que sea del orden de una décima parte del espesor de la capa de Stokes. Para lograr esto se procede con el siguiente método iterativo: cada vez que se refine la malla se debe hacer un chequeo (*Check*) de la misma para obtener el valor del volumen mínimo de la celda (*Minimum Volume*), que estando en un problema bidimensional como este en el que las profundidades no tienen importancia (ya que es bidimensional) se transforma en un volumen por unidad de longitud, es decir, tiene unidades de superficie (m^2). Si dividimos, cada vez que refinemos la malla, este valor del volumen mínimo entre la longitud perimetral de cada celda del cilindro (lo cuál se hace dividiendo la longitud de la circunferencia del cilindro entre el número de divisiones que tenga el cilindro en cada paso del refinado), se obtiene el espesor mínimo de las celdas de la malla que tiene que haber en la zona próxima al cilindro de la capa de Stokes en la iteración en la que se encuentre el proceso. Se realizan tantas iteraciones como sean necesarias hasta que el valor calculado resulte del orden o menor que una décima parte del espesor de la capa de Stokes tal y como muestra la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Volumen mínimo celda } \left(\frac{m^3}{m}\right)}{\frac{2 \cdot \pi \cdot r (m)}{160 \cdot 2^{n_r}}} \sim \frac{\frac{\varepsilon \cdot a}{\sqrt{R_s}}}{10}$$

Siendo r el radio del cilindro en metros, n_r el número de refinados hechos y el número 160 aparece ya que, inicialmente en la malla sin refinar ($n_r = 0$) la superficie del cilindro tiene 160 divisiones.

El método utilizado para el refinado depende de ε y R_s , por lo tanto se deben realizar distintos refinados dependiendo del caso a estudio:

Caso	ε	R_s	$\frac{a}{\sqrt{R_s}} (m)$	$\frac{\varepsilon \cdot a}{\sqrt{R_s}} (m)$	$\frac{\varepsilon \cdot a}{\frac{\sqrt{R_s}}{10}} (m)$
1	0,1	40	$1,581 \cdot 10^{-3}$	$1,581 \cdot 10^{-4}$	$1,581 \cdot 10^{-5}$
2	0,2	40	$1,581 \cdot 10^{-3}$	$3,162 \cdot 10^{-4}$	$3,162 \cdot 10^{-5}$
3	0,1	160	$7,905 \cdot 10^{-4}$	$7,905 \cdot 10^{-5}$	$7,905 \cdot 10^{-6}$

Tabla 3: Espesores teóricos de la capa límite, capa de Stokes y décima parte de la capa de Stokes.

Para refinar la malla se elige *Adapt / Boundary*: en la ventana emergente se va al apartado *Controls* y se cambia *Max Levels of Refine* a 20 por ejemplo (por defecto viene marcado 2 pero lo cambiamos para que deje refinar mas de una vez la misma superficie), se elige la parte de la malla que se quiere refinar (*cylinder* en nuestro caso) y el tipo de refinado que se le va a realizar (*Cell Distance*): se refinan las 2 celdas adyacentes a la superficie cilíndrica.

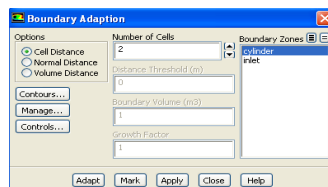


Figura 41: Ventana de opciones del refinado.

El proceso iterativo de refinado se muestra a continuación:

n_r	$\frac{\text{Volumen mínimo celda}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot r}{100 \cdot 2^{n_r}}} (m)$	Numero de celdas en la capa de Stokes	Casos que cumplen condición de refinado
1	$4,746 \cdot 10^{-4}$	4	
2	$2,349 \cdot 10^{-4}$	6	
3	$1,167 \cdot 10^{-4}$	8	
4	$5,808 \cdot 10^{-5}$	10	
5	$2,895 \cdot 10^{-5}$	12	
6	$1,444 \cdot 10^{-5}$	14	1 y 2
7	$7,215 \cdot 10^{-6}$	16	3

Tabla 4 : Método iterativo de refinado.

Por lo tanto la malla para los casos 1 y 2 será la misma, mientras que para el caso 3 habrá que utilizar otra con un grado mayor de refinamiento:

	Celdas	Caras	Nodos
Malla inicial sin refinar	8000	16160	8160
Malla refinada casos 1 y 2	68480	147200	78720
Malla refinada caso 3	129920	280320	150400

Tabla 5: Características de las distintas mallas empleadas.

Cómo se puede observar el número de celdas se dispara en el caso número 3 debido a que necesita un refinado mayor por sus parámetros característicos ε y R_S ; esto se traduce en un mayor tiempo de simulación (tiempo computacional) pero también en una mayor precisión en la zona cercana a la superficie cilíndrica para intentar visualizar la capa de Stokes y la capa límite.

2.3.2. Implementación del caso

Se comienza definiendo los parámetros del problema:

PROBLEM SETUP:

- **GENERAL:** en este apartado se pueden observar dos cuadros de menú:
 - **MESH:** en este menú aparecen distintos botones:
 - *Scale:* con este botón se escala la malla en las unidades de distancia deseadas para el problema. Se eligen metros (m).
 - *Check:* con este botón se pueden chequear las características de la malla (nodos, celdas...) tal y como se ha explicado anteriormente.
 - *Display:* con este botón aparece una ventana emergente en la que se pueden elegir las partes de la malla para mostrar y diversas opciones visuales más.
 - **SOLVER:** en este menú se marcan las siguientes opciones:
 - *Type: Pressure- based* (ya que el problema es incompresible ($\rho = cte$) y de velocidades bajas, que es el tipo de problemas que resuelve este método mediante ecuaciones desacopladas).
 - *Velocity formulation: Absolute* (se trabaja con velocidades absolutas).
 - *Time : Transient* (se tiene un problema transitorio, no-estacionario, en el que la solución varía con el tiempo).
 - *2D Space: Planar* (el problema es bidimensional plano).
 - Casilla *Gravity:* esta casilla no se marca ya que en este problema bidimensional plano no se tiene en cuenta la gravedad.

- **MODELS:** en este apartado se selecciona la opción *Viscous*, se presiona el botón *Edit* y se elige el modelo *Laminar* (flujo laminar ya que los números de *Re* son bajos). Se debe verificar que la ecuación de la energía está desactivada (*Energy - Off*), ya que en el problema no hay variaciones de temperatura.
- **MATERIALS:** en este apartado se deben seleccionar los materiales tanto líquidos como sólidos que intervienen en el problema:
 - **Fluid:** se selecciona el fluido de trabajo y se hace click en el botón de la parte inferior (*Create/Edit...*) para elegir el tipo de fluido que va a rodear a los cilindros en la simulación. Se va a trabajar con un fluido inventado cuya densidad es la del agua y su viscosidad dinámica se obtiene de las siguientes expresiones características del flujo oscilatorio, dependiendo del caso de estudio:

$$\varepsilon = \frac{U_0}{w \cdot a}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Se establece para todos los casos una frecuencia de $f = 1$ Hz, es decir, el periodo es de $T = 1$ s, que significa que cada 0,5 s la velocidad cambia de signo $\rightarrow \omega = 2 \cdot \pi \cdot 1 \rightarrow U_0 = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot a$

$$R_S = \varepsilon \cdot R_S = \frac{\varepsilon \cdot U_0 \cdot a}{\nu} \rightarrow \nu = \frac{2 \cdot \pi \cdot (\varepsilon \cdot a)^2}{R_S}$$

$$\mu = \rho \cdot \nu$$

Siendo $f = 1$ Hz, $r = 1$ cm = 0,01 m y $\rho_{\text{fluido}} = 1000$ kg/m³ para todos los casos:

Caso	ε	R_S	U_0 (m/s)	ν (m ² /s)	μ (kg/m.s)
1	0,1	40	$6,283 \cdot 10^{-3}$	$1,570 \cdot 10^{-7}$	$1,570 \cdot 10^{-4}$
2	0,2	40	$1,256 \cdot 10^{-2}$	$6,283 \cdot 10^{-7}$	$6,283 \cdot 10^{-4}$
3	0,1	160	$6,283 \cdot 10^{-3}$	$3,927 \cdot 10^{-8}$	$3,927 \cdot 10^{-5}$

Tabla 6: Amplitud de velocidad (U_0), viscosidad cinemática (ν) y dinámica (μ) para cada caso.

- **Solid:** se deja el Aluminio (Al) como material del cilindro (viene marcado por defecto, no se ha elegido por ningún motivo concreto, ya que lo que realmente interesa son las características del fluido) y su densidad es:

$$\rho_{\text{Al}} \approx 2719 \text{ kg/m}^3$$
- **CELL ZONE CONDITIONS:** se deja este apartado por defecto. Se pueden cambiar condiciones de operación con el botón *Operating Conditions*, como son la presión (se deja la de referencia de 101325 Pa), el punto de

referencia del sistema de ejes coordenados (por defecto (0,0)) y también se puede marcar la casilla para que actúe la gravedad en el problema (se deja desactivada ya que el problema es bidimensional plano).

➤ **BOUNDARY CONDITIONS:** en este apartado se pueden cambiar las condiciones de contorno del problema. Previamente, en la creación de la malla, se ha dado nombre a las superficies más significativas de la malla y del problema para poder localizarlas en ANSYS FLUENT. Estas regiones del problema son:

- *Cylinder: Type = Wall*, y seleccionando el botón *Edit...* se dejan marcadas las condiciones *Stationary Wall* en el apartado *Wall Motion* (cilindro fijo) y *No Slip* en el apartado *Shear Condition* (condición de no deslizamiento en la superficie del cilindro).
- *Inlet: Type = Velocity inlet*.

En este punto se debe introducir una función UDF (*User Defined Function*) que rijas el comportamiento oscilante del fluido; esta función se ha creado en código C de programación para poder representar la velocidad mediante la ecuación. Tal y como se ha visto anteriormente la amplitud de la velocidad U_0 depende de ε :

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$$

$$U_0 = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot a$$

$$U_0=f(\varepsilon) \rightarrow \varepsilon(\text{caso1})=\varepsilon(\text{caso3}) \rightarrow U_0(\text{caso1})=U_0(\text{caso3})$$

Donde U_0 es la amplitud de la velocidad, f es la frecuencia, t es el tiempo y a el radio del cilindro.

Posteriormente se presiona el botón *Edit...* mediante el cual aparecerá una ventana abierta por la pestaña *Momentum* en la que se deben cambiar los parámetros de la velocidad del fluido: se elige en *Velocity Specification Method* (el método de especificación de la velocidad) *Magnitude and direction* (se representa el vector velocidad del fluido mediante sus componentes x e y), en *Reference Frame* (el marco de referencia) *Absolute* (velocidad absoluta), en *Velocity Magnitude* se elige la función UDF en código C previamente introducida (*udf unsteady_velocity*) y para terminar se dan los valores deseados a las componentes x e y de la velocidad para las distintas simulaciones eligiendo la opción *constant* para ambas componentes.

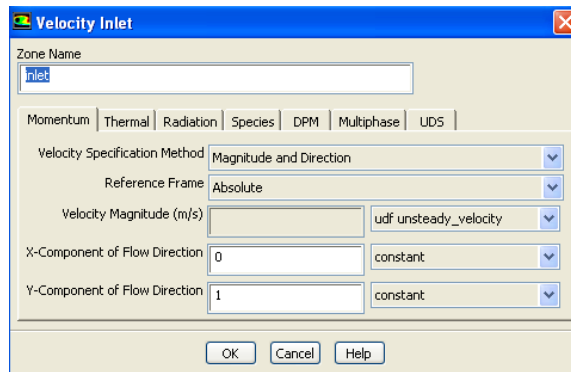


Figura 42: Ventana con parámetros de la velocidad de nuestro problema.

- *Interior-part-surface_body*: *Type* = interior.
 - *part*: *Type* = interior.
- **REFERENCE VALUES**: se hace un chequeo de los valores de referencia de las variables que intervienen en el problema pudiéndose cambiar si es necesario.

SOLUTION:

- **SOLUTION METHODS**: en el apartado *Pressure-Velocity Coupling* el método que se va a utilizar para resolver el problema es PISO que permite el uso de pasos temporales altos sin que se vea afectada la estabilidad de la solución; es el método recomendado para la resolución de problemas transitorios como este.

En el apartado *Spatial Discretization*: *Gradient* = *Least Squares Cell Based*, *Pressure* = *Standard* y *Momentum* = *Second Order Upwind* para definir de una mejor manera el dominio del problema.

En el apartado *Transient Formulation* se elige *Second Order Implicit*, una resolución de segundo orden de precisión.

- **MONITORS**:
- *Residuals*: en este apartado se define el criterio de convergencia del problema dando un valor determinado a los residuos; este valor elegido es fundamental para la precisión de la simulación y para el tiempo computacional: cuanto más pequeño sea, más se ajusta el problema a la realidad, pero por el contrario el programa tarda más en converger hacia una solución final. Se hace click en *Edit* para cambiar los residuos (*Continuity*, *x-velocity* e *y-velocity*) y fijarlos a 10^{-5} .
- **SOLUTION INITIALIZATION**: en este apartado se inicializa el problema para llevar a cabo el método iterativo de resolución dando las condiciones iniciales de velocidad y presión deseadas. Se supone que el fluido parte del reposo en el instante inicial y que la presión es nula:

- $P_0 = 0$.

$$\circ U(t=0)=U_0.\sin(2.\pi.0)=0 \text{ m/s} \rightarrow V_x=V_y=0.$$

Se inicializa el problema haciendo click en el botón *Initialize*.

- *CALCULATION ACTIVITIES*: en este apartado se puede elegir cada cuantas iteraciones guardar el caso y como exportar los archivos *.dat* de velocidades de cada paso temporal que se van a necesitar para representar posteriormente mediante TecPlot 360. Para este experimento se elige la opción de exportar cada 50 *time steps*, ya que se va a dividir cada ciclo en 200 puntos (o *time steps*) y se quiere tener 4 puntos significativos de cada ciclo para ver la trayectoria de las sendas en el post-procesamiento de los datos del problema como se verá en el próximo capítulo.
- *RUN CALCULATION*: en este último apartado de la creación del caso para la simulación se introducen los valores del problema oscilatorio:

Como el problema es transitorio se deben introducir datos como el número de pasos por ciclo y el paso temporal: Se ha decidido simular el fenómeno 100 ciclos.

Time step size: este valor representa el paso temporal existente entre los puntos consecutivos que dividen en partes iguales un ciclo de la onda.

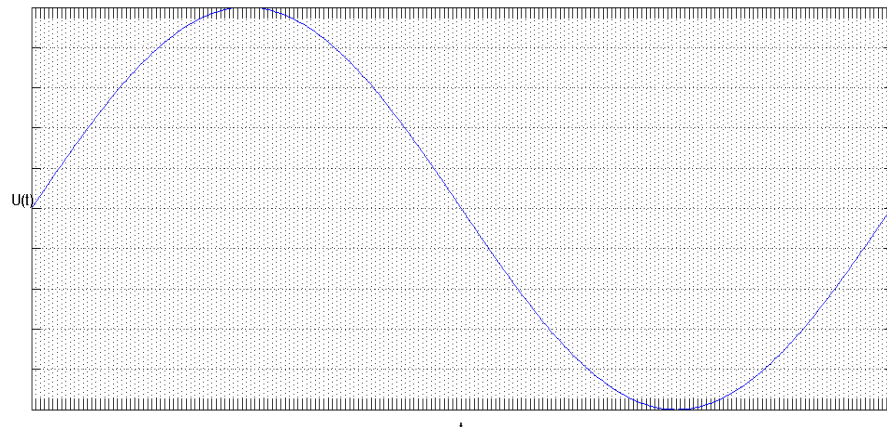


Figura 43: Detalle de un ciclo de la onda sinusoidal de velocidad, $U(t)$, segmentada en 200 *time steps*.

Por lo tanto si se divide cada ciclo en 200 puntos para obtener una buena representación de las velocidades en la simulación:

$$\text{Number of } ts = 200 \text{ ts/ciclo} \times 100 \text{ ciclos} = 20000 \text{ ts}$$

Siendo ts =time step.

Como se tiene que: $f = 1 \text{ Hz} \rightarrow \text{Periodo } (T) = 1/f = 1 \text{ s}$

$$Time\ step\ size = \frac{Periodo\ (T)}{Number\ of\ time\ steps} = \frac{1}{200} = 5,0 \cdot 10^{-3}\ s$$

Una vez inicializado el caso e introducidos todos los valores anteriormente explicados, se procede con el cálculo iterativo del problema pulsando el botón *Calculate*.

2.4. Cálculo de líneas de corriente del flujo promediado

El cálculo de promedios temporales en ANSYS FLUENT es complejo y no se puede realizar únicamente con las herramientas que proporciona el programa. Para obtenerlo, una vez simulados 100 ciclos de cada caso, con todos los archivos exportados, se simularán 200 *time steps* más (un ciclo), exportando los archivos *.dat* para obtener las líneas de corriente del flujo promediado mediante la utilización de dos scripts en lenguaje C que se adjuntan en los *Anexos*:

- *avg.c* : para usar como UDF.
- *scm-file* : para hacer funcionar la UDF anterior.

Una vez se tienen todos los archivos *.dat* exportados de un ciclo y los dos scripts anteriores en el mismo directorio, se introduce el siguiente comando en la consola de ANSYS FLUENT para obtener las líneas de corriente del flujo promediado:

(avg 20000 2 100 "ts-2-")

- 20000 es el número de *time steps* a partir del cual se ha simulado el último ciclo usando la UDF *avg.c*.
- 2 es la frecuencia exportación elegida de los archivos *.dat*.
- 100 es el número de archivos exportados en total sobre el que se van a promediar las velocidades.
- "ts-2-" es la raíz que se ha elegido que tengan en común todos los archivos *.dat* exportados del caso.

2.5. Post-procesamiento de datos

Se ha decidido simular 100 ciclos de cada caso propuesto, dividiendo cada ciclo de la onda en 200 *time steps* y exportando cada 50 *time steps* el archivo *.dat* como se ha explicado anteriormente; por lo tanto, para cada caso se simulan 20000 *time steps* y se exportan 400 archivos *.dat* para procesar posteriormente con el *software* TecPlot 360 (versión 2010).

Se utiliza este software ya que permite cargar los casos (*.cas*) con los datos (*.dat*) simulados previamente con ANSYS FLUENT y realiza de una manera muy

eficaz el seguimiento de sendas (inyecciones de partículas para el seguimiento de sus trayectorias en el dominio fluido).

Se ha decidido realizar sendas cada 15°, en la mitad de los espesores teóricos calculados de la capa de Stokes y de la capa límite; en todos los cuadrantes exceptuando los ejes cartesianos, ya que en esos ángulos (0°, 90°, 180° y 270°) las sendas no demuestran nada de lo que se quiere visualizar:

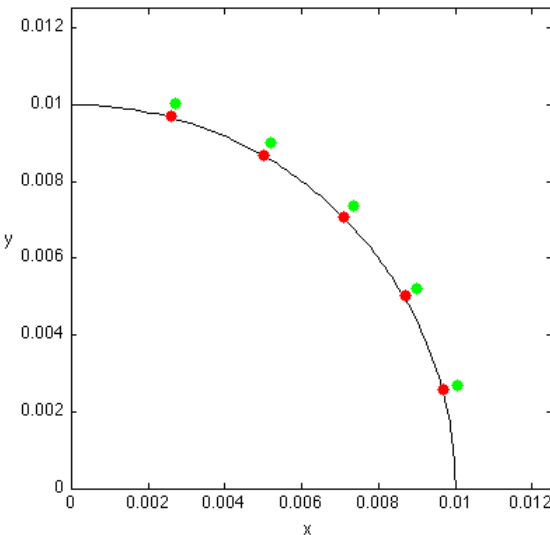


Figura 44: Esquema de sendas en capa de Stokes y capa límite.

Para cada caso de estudio, al tener diferentes espesores de capa de Stokes y capa límite, se realizan las sendas en distintos puntos:

Caso	Distancia radial senda (m)	(x,y) senda (m)	15°	30°	45°	60°	75°
1	$1,008 \cdot 10^{-2}$	X	$9,73 \cdot 10^{-3}$	$8,73 \cdot 10^{-3}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$	$5,04 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
		Y	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$5,04 \cdot 10^{-3}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$	$8,73 \cdot 10^{-3}$	$9,73 \cdot 10^{-3}$
	$1,08 \cdot 10^{-2}$	X	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$9,35 \cdot 10^{-3}$	$7,63 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-3}$
		Y	$2,79 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$7,63 \cdot 10^{-3}$	$9,35 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$
2	$1,016 \cdot 10^{-2}$	X	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$8,79 \cdot 10^{-3}$	$7,18 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-3}$	$2,63 \cdot 10^{-3}$
		Y	$2,63 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-3}$	$7,18 \cdot 10^{-3}$	$8,79 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^{-3}$
	$1,08 \cdot 10^{-2}$	X	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$9,35 \cdot 10^{-3}$	$7,63 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-3}$
		Y	$2,79 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$7,63 \cdot 10^{-3}$	$9,35 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$
3	$1,004 \cdot 10^{-2}$	X	$9,69 \cdot 10^{-3}$	$8,69 \cdot 10^{-3}$	$7,09 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{-3}$
		Y	$2,59 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$7,09 \cdot 10^{-3}$	$8,69 \cdot 10^{-3}$	$9,69 \cdot 10^{-3}$
	$1,04 \cdot 10^{-2}$	X	$1,004 \cdot 10^{-2}$	$9,006 \cdot 10^{-3}$	$7,35 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$
		Y	$2,69 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$7,35 \cdot 10^{-3}$	$9,006 \cdot 10^{-3}$	$1,004 \cdot 10^{-2}$

Tabla 7: Tabla con datos de las distancias de las sendas para cada caso de estudio.

3. Alternativa: código de simulación GERRIS

GERRIS es un software libre que sirve para obtener la solución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de un campo fluido. Sus principales características son:

- Resuelve las ecuaciones de flujo incompresible dependientes del tiempo de Euler, Stokes y Navier-Stokes.
- Resuelve las ecuaciones superficiales lineales y no lineales.
- Refinamiento adaptativo de la malla: la resolución se adapta dinámicamente al tipo flujo y geometría.
- Generación automática de mallas en geometrías complejas.
- Resolución de segundo orden en espacio y tiempo.
- Posibilidad ilimitada de agregar sendas (trazadores pasivos) para seguir el movimiento de un flujo.

Estos experimentos no se explican con tanto detalle como los realizados en apartados anteriores, ya que simplemente se utiliza como alternativa gratuita a los anteriores paquetes de *software* empleados para el estudio de este tipo de problemas. En el Anexo se adjunta el script utilizado para definir el problema. La malla que se utiliza para este experimento es la siguiente:

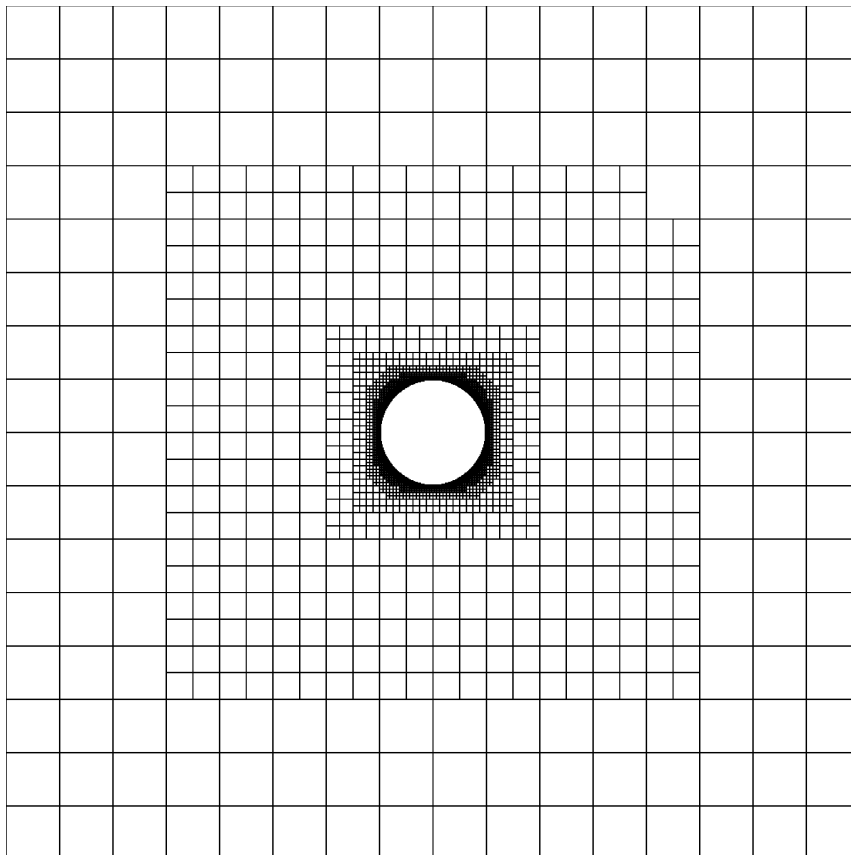


Figura 45: Malla generada en GERRIS.

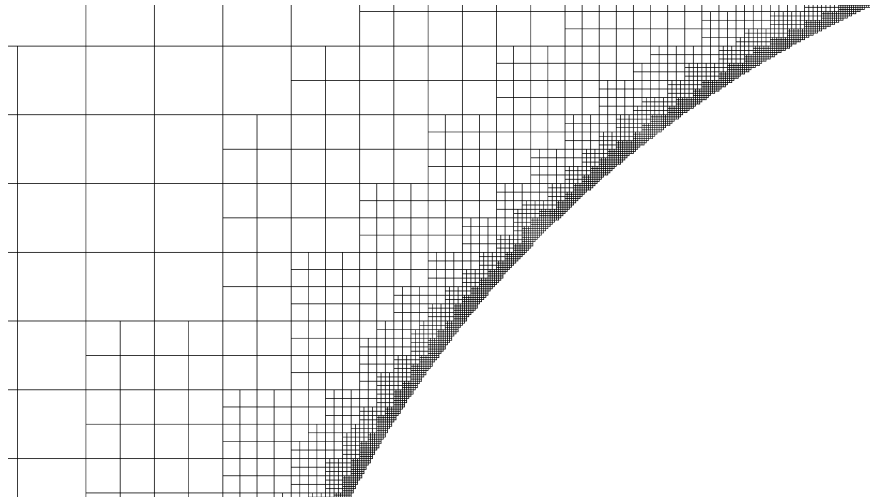


Figura 46: Detalle del refinado de la malla realizado en GERRIS en la superficie del cilindro.

4. Resultados

4.1. ANSYS FLUENT

4.1.1. Sendas (obtenidas en TecPlot360)

Se han obtenido las siguientes imágenes que muestran la trayectoria de cada senda durante los 100 ciclos simulados en cada caso.

- Caso 1: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 40$.

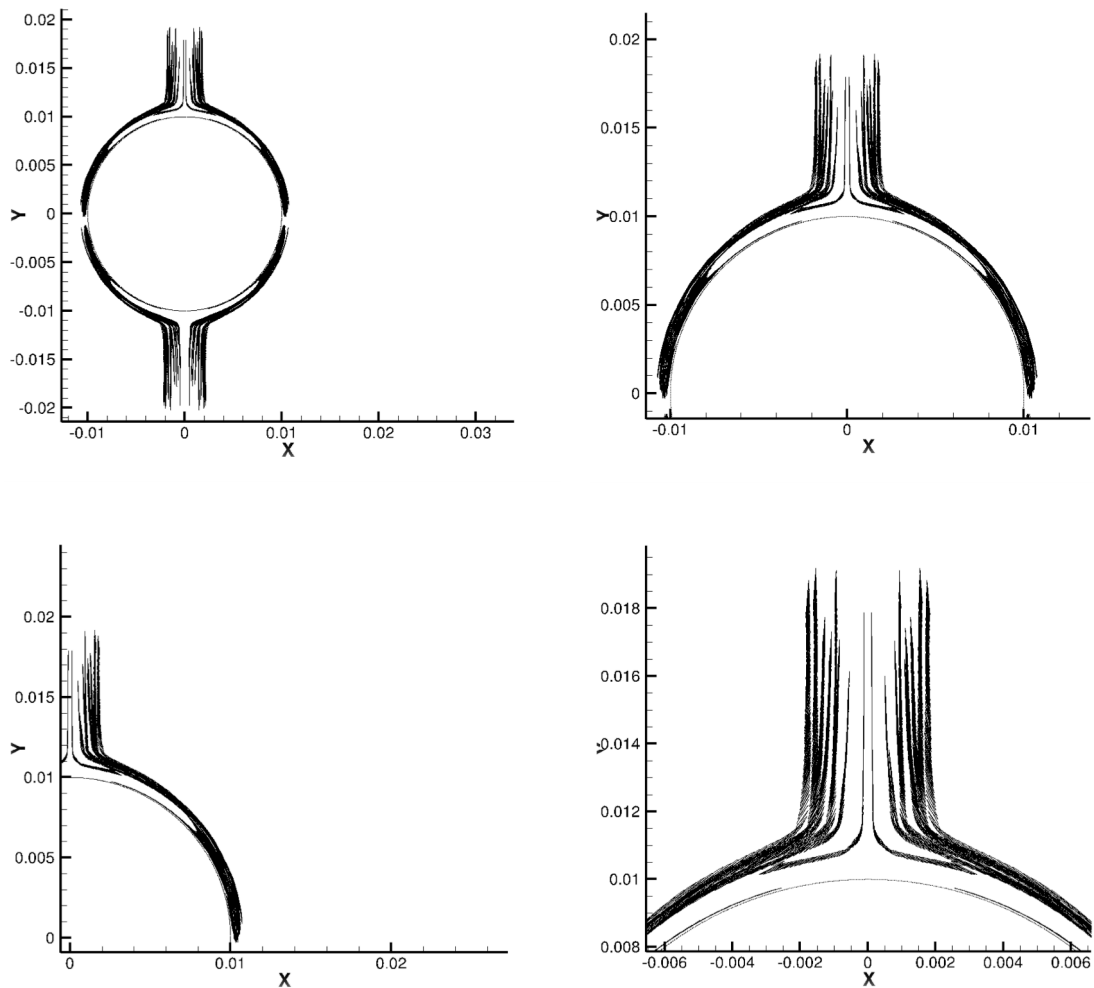


Figura 47: Seguimiento de sendas para el Caso 1.

Se puede observar como el fluido que recircula en la capa límite choca en los puntos de eyección y da lugar a un chorro que sigue la dirección del movimiento del flujo oscilatorio. Se aprecia simetría y también se puede ver ligeramente una recirculación dentro de la capa límite y estimar el espesor de la misma visualmente; obteniendo un valor aproximado de $1,5 \cdot 10^{-3}$ m, que prácticamente coincide con el teórico $\left(\frac{a}{\sqrt{R_S}}\right)$, que es $1,581 \cdot 10^{-3}$ m.

- Caso 2: $\varepsilon = 0,2$ y $R_S = 40$.

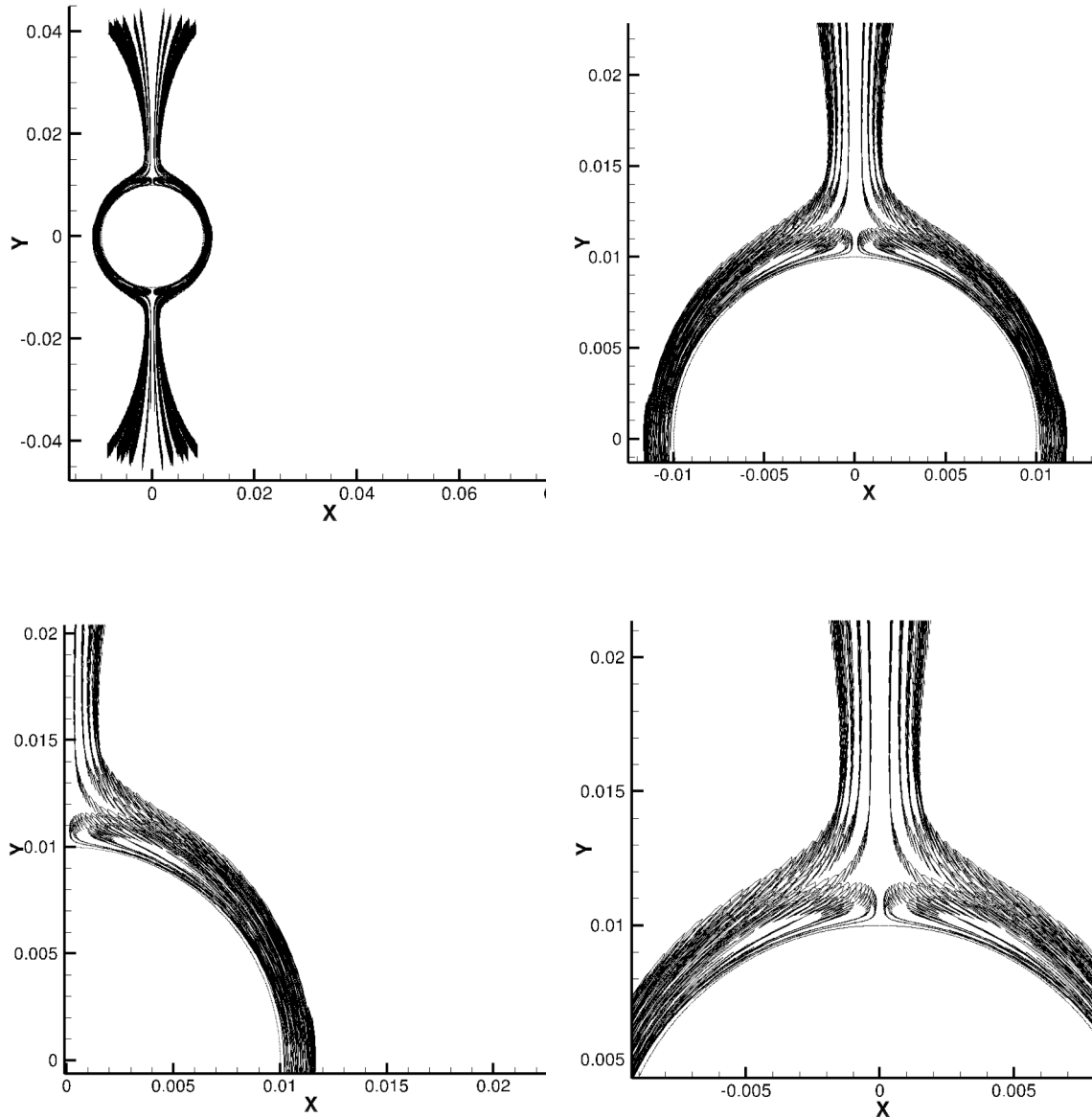


Figura 48: Seguimiento de sendas para el Caso 2.

Para este caso también se puede apreciar como el fluido que circula dentro de la capa límite choca en los puntos de eyección y da lugar a dos chorros simétricos con la dirección del movimiento del flujo. En este caso se aprecia mejor la recirculación dentro de la capa límite. Al duplicarse ε respecto al caso base anterior, se aumenta la velocidad de oscilación, lo que implica mayor cantidad de movimiento, que se traduce en un mayor número de líneas visualmente hablando. Se puede estimar visualmente el espesor de la capa límite y se obtiene un valor aproximado de $1,7 \cdot 10^{-3}$ m, que prácticamente coincide con el teórico, que es $1,581 \cdot 10^{-3}$ m.

- Caso 3: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 160$.

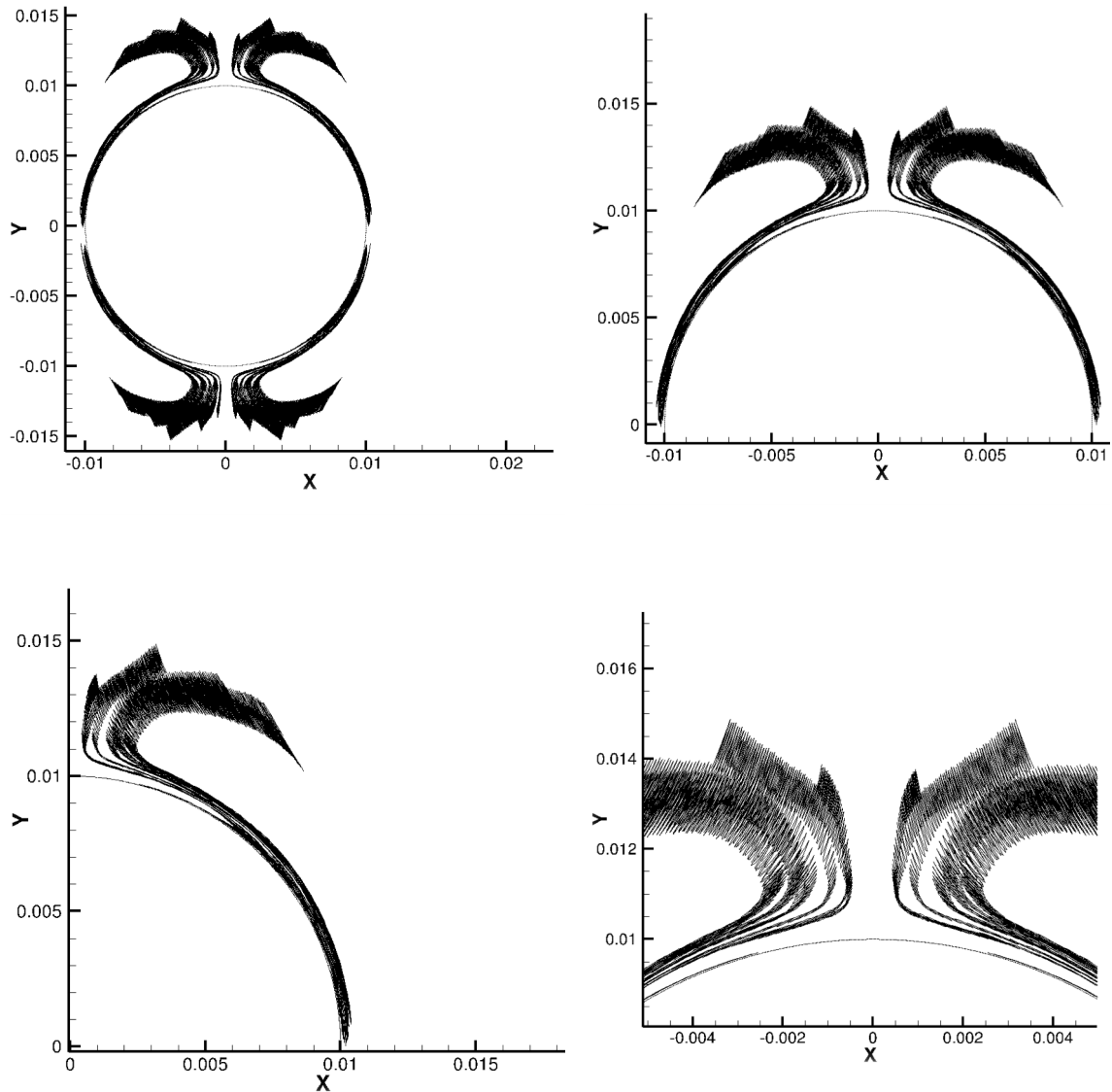


Figura 49: Seguimiento de sendas para el Caso 3.

En este último caso también se aprecia el choque del fluido que circula dentro de la capa límite dando lugar a la eyección de dos chorros simétricos en los puntos de eyección que siguen la dirección de movimiento del flujo, como se puede ver en las imágenes. No se aprecia claramente la recirculación dentro de la capa límite y se puede estimar su espesor visualmente obteniendo un valor aproximado de $7,0 \cdot 10^{-4}$ m, muy próximo al valor calculado teóricamente, que es $7,905 \cdot 10^{-4}$ m; y tiene mucho sentido tal y como dice la teoría, ya que la capa límite es proporcional a $\frac{1}{\sqrt{R_S}}$, y en este caso el número R_S es cuatro veces mayor al de los dos casos anteriores, y efectivamente el espesor de la capa límite obtenido es bastante más pequeño que en los casos anteriores.

- Pruebas de sendas realizadas:

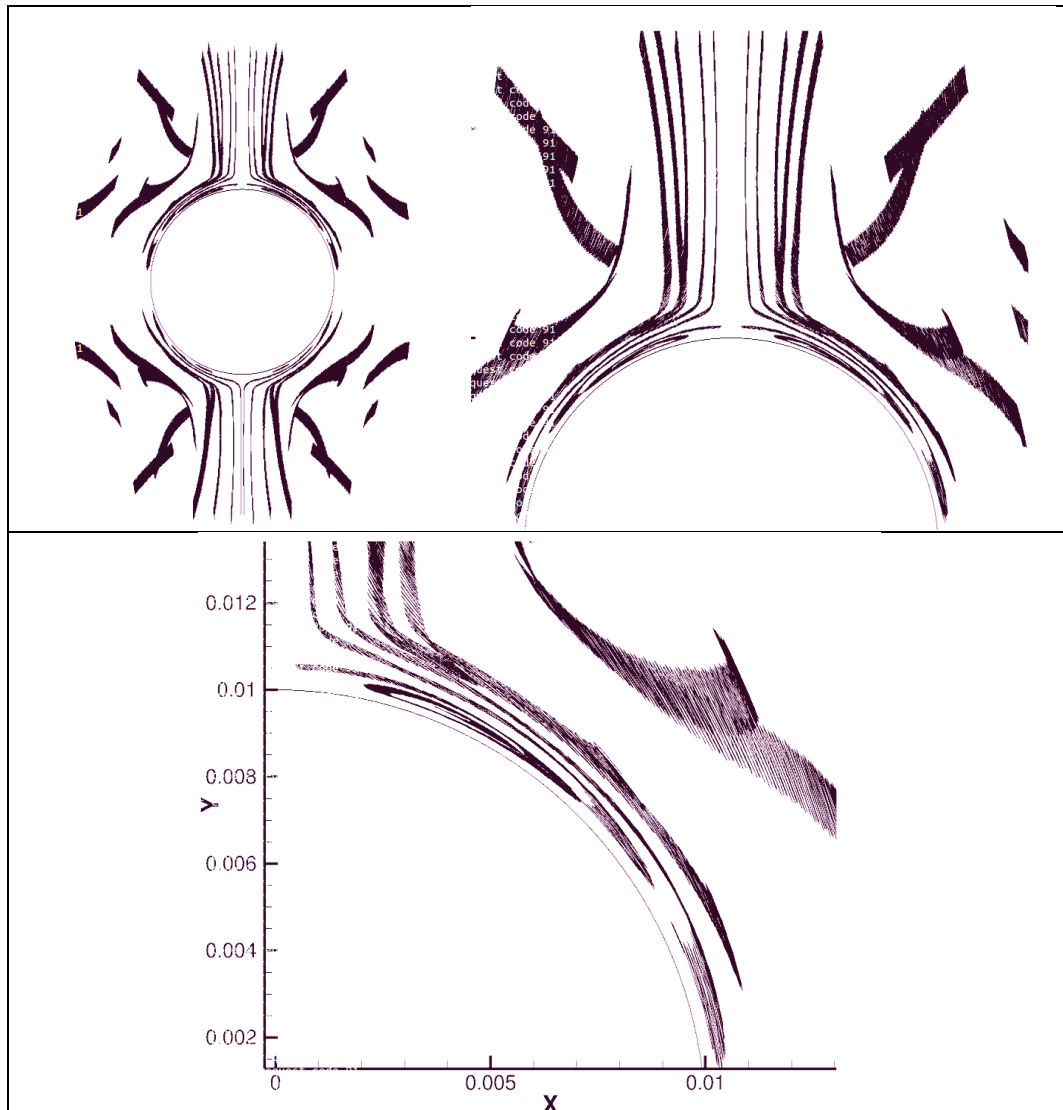


Figura 50: pruebas de sendas realizadas para el Caso 1.

Antes de realizar las sendas explicadas en anteriores apartados, se hicieron múltiples pruebas y se obtuvieron imágenes como la anterior, que muestra la estructura típica de *Steady Streaming* pero de una manera poco clara, lo que nos ayudó a realizar las sendas adecuadas para la correcta visualización del fenómeno y la capa límite. Esta imagen corresponde con una prueba realizada para el Caso 1.

4.1.2. Flujo promediado

Se realiza el promedio de velocidades sobre un ciclo simulado después de 100 ciclos simulados.

- Caso 1: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 40$.

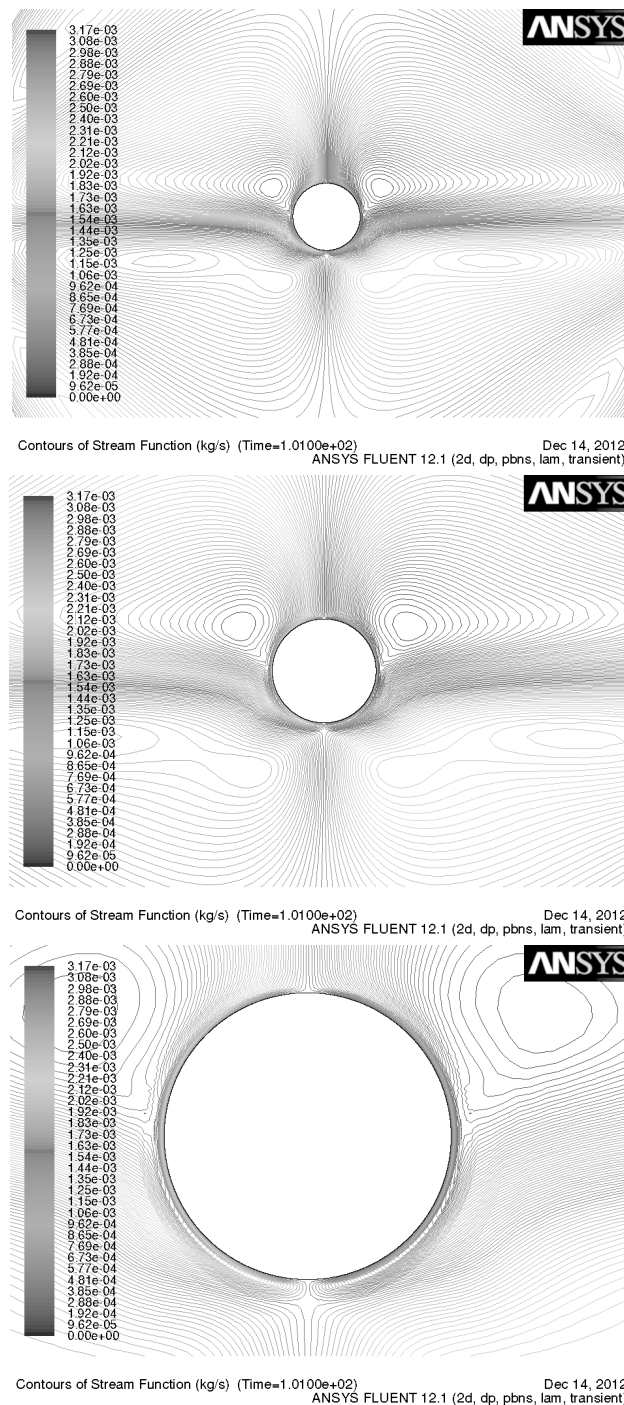


Figura 51: Flujo promediado en ANSYS FLUENT para el Caso 1 (101 ciclos simulados).

Se puede apreciar claramente la estructura característica del fenómeno del *Steady Streaming*; cuatro recirculaciones que aparecen próximas a la superficie cilíndrica dentro de la capa límite (que tiene un espesor muy fino) que inducen otras cuatro recirculaciones fuera de la misma. No presenta la simetría característica del fenómeno (el tamaño de las recirculaciones no es homogéneo), pudiendo ser debido a que no se han simulado el número de ciclos suficientes para que el fenómeno sea estable.

- Caso 2: $\varepsilon = 0,2$ y $R_S = 40$.

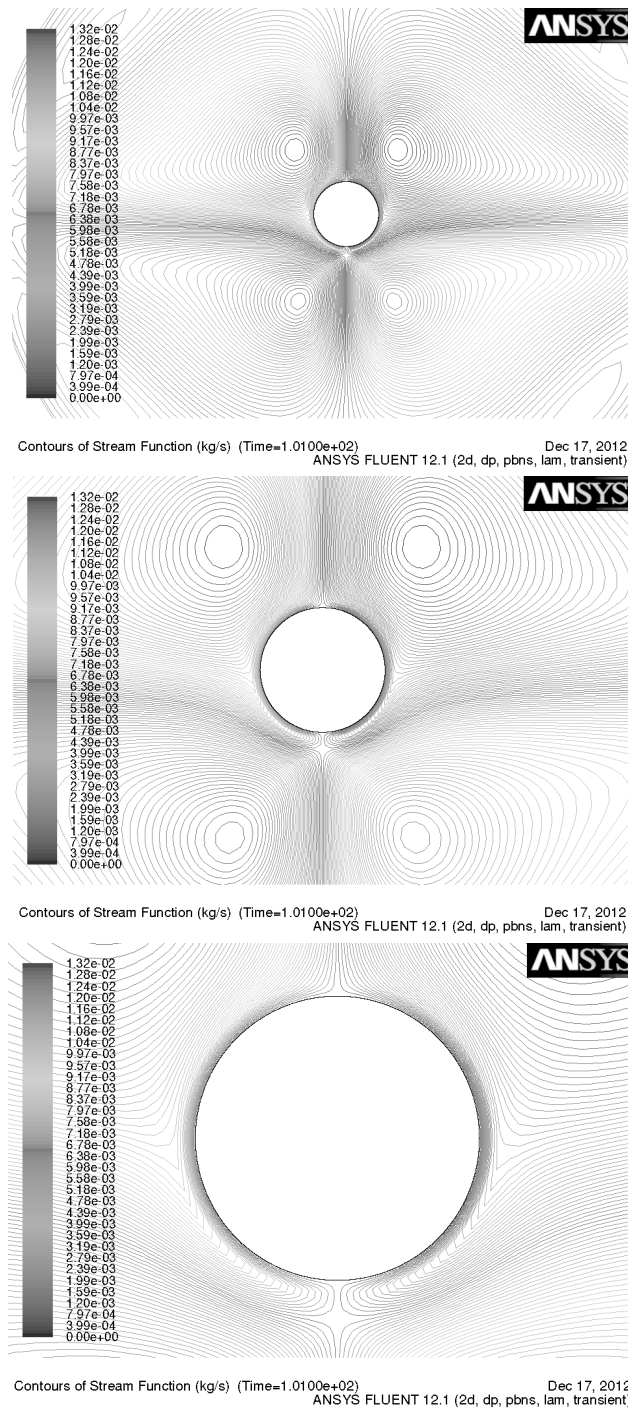


Figura 52: Flujo promediado en ANSYS FLUENT para el Caso 2 (101 ciclos simulados).

Para este caso en el que se duplica el valor de ε respecto al caso anterior (lo que se traduce en una mayor velocidad del fluido), se aprecia claramente la estructura de recirculaciones características del fenómeno, con un tamaño más homogéneo de los vórtices y mayor simetría que en el caso base (Caso 1), aunque no llega a ser perfectamente simétrico.

- Caso 3: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 160$.

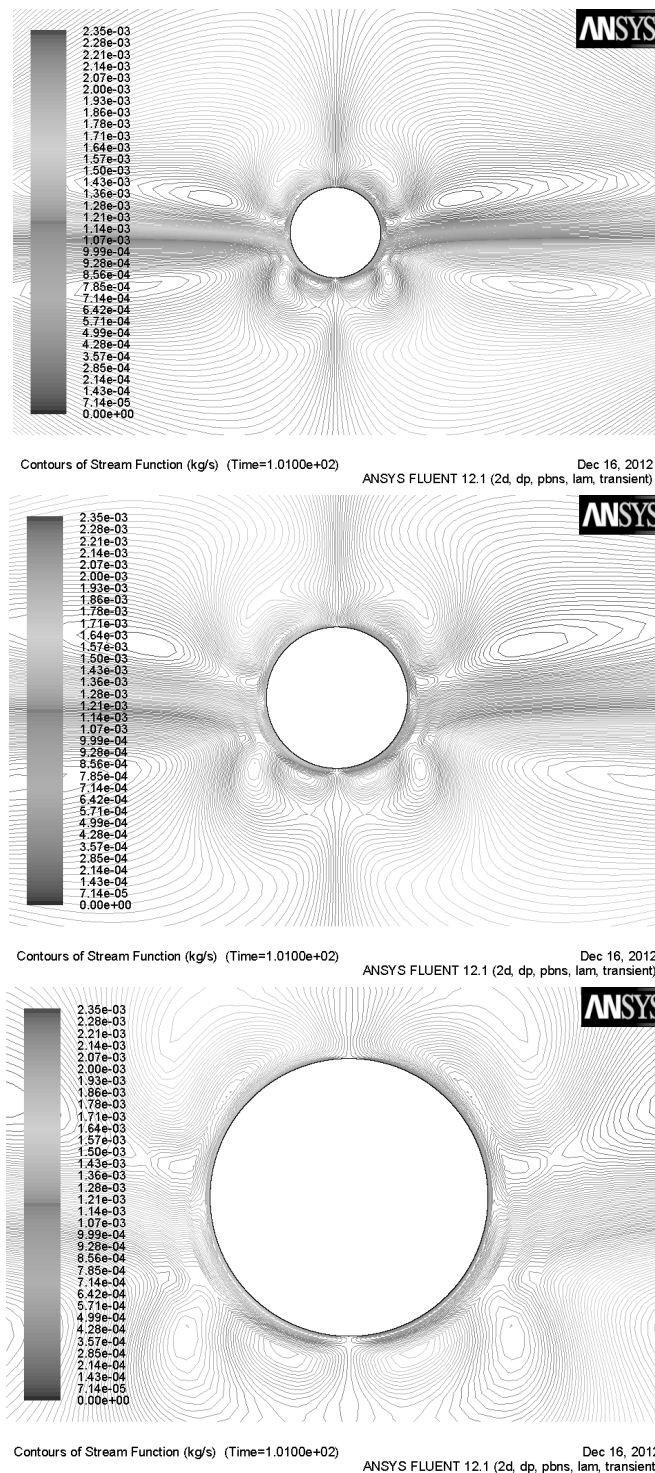


Figura 53: Flujo promediado en ANSYS FLUENT para el Caso 3 (101 ciclos simulados).

En este último caso, en el que se cuadruplica el valor de R_S respecto a los dos casos anteriores, el tamaño de las recirculaciones que aparecen alrededor del cilindro son más pequeñas y planas que en los casos anteriores. La estructura es bastante simétrica, aunque no llega a serlo del todo, pudiendo ser debido a la falta de ciclos simulados.

- Prueba alternativa para el Caso 1 ($\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 40$): promedio temporal sobre un ciclo después de haberse simulado 200 ciclos (40000 ts).

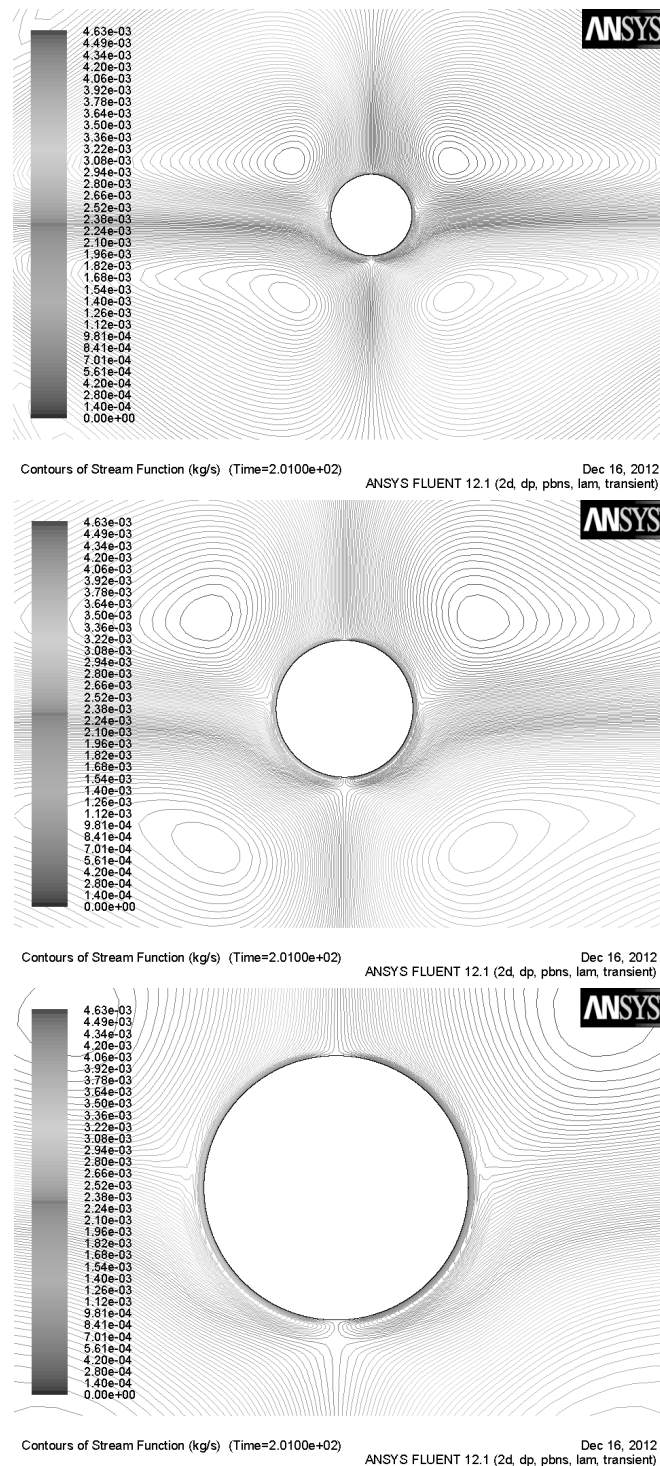


Figura 54: Flujo promediado en ANSYS FLUENT para el Caso 1 (201 ciclos simulados).

Se aprecia la estructura de recirculaciones alrededor del cilindro, de una forma bastante simétrica y la eyección del chorro fluido en la dirección de movimiento del flujo oscilatorio, al igual que para todos los casos anteriores.

- Comparación de pruebas anteriores del Caso 1: 101 ciclos frente a 201 ciclos simulados.

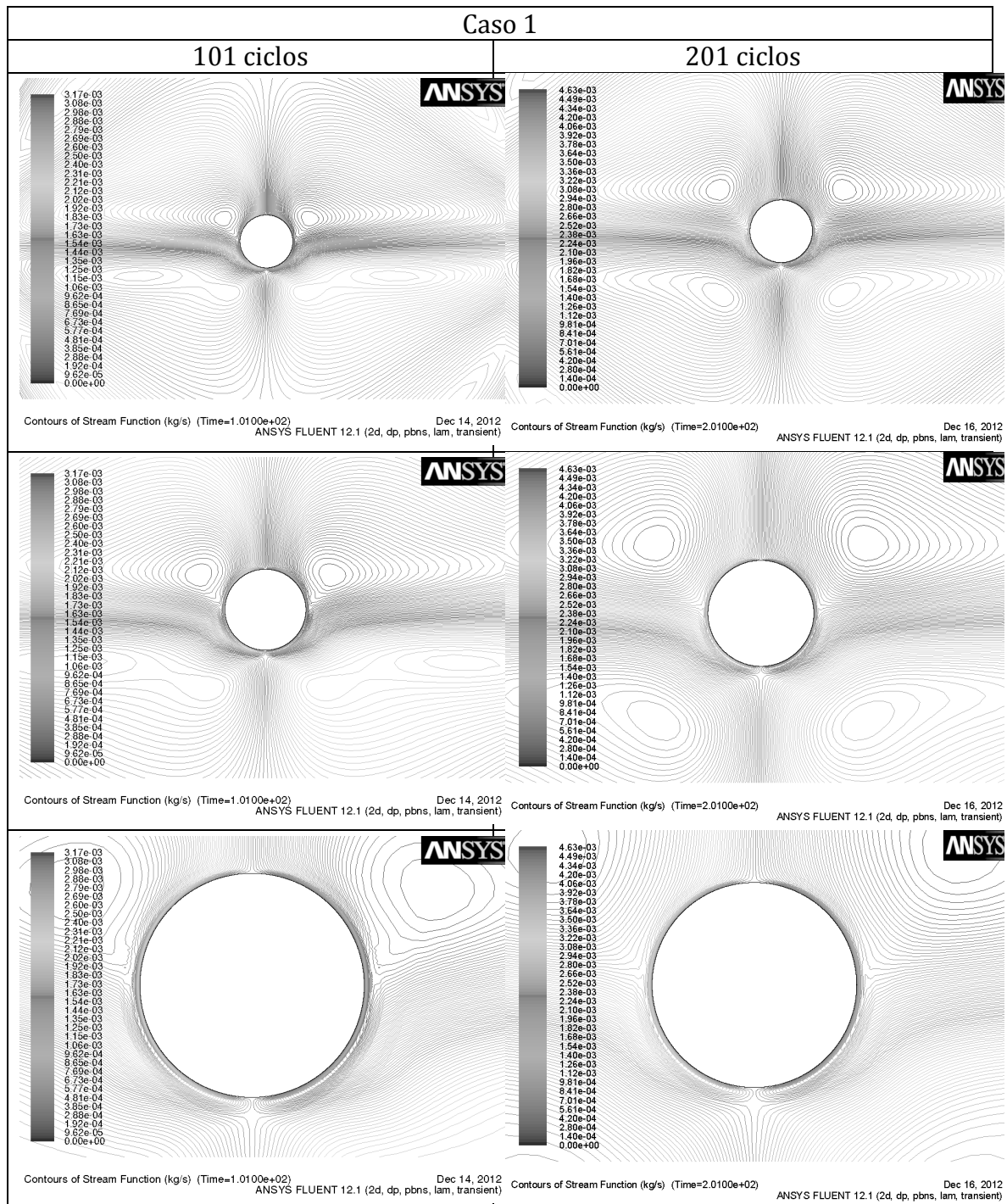


Figura 55: Comparación del Caso 1 simulado 101 y 201 ciclos.

Con la anterior comparación se puede demostrar que a mayor número de ciclos simulados, la estructura de vórtices generados alrededor de la superficie cilíndrica va a resultar más homogénea y simétrica, es decir, el fenómeno del *Steady Streaming* se estabiliza a mayor número de ciclos simulados.

4.2. Gerris

4.2.1. Sendas

Para visualizar el fenómeno se ha seguido una senda alrededor de la superficie cilíndrica con un espesor del orden del espesor teórico de la capa límite para cada caso. Se pretende obtener las líneas de corriente del flujo promediado en el tiempo e imágenes y animaciones que demuestren las sendas dentro de la capa límite y de los chorros eyectados.

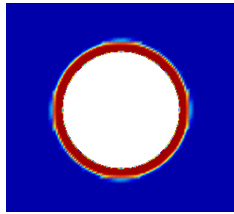


Figura 56: Detalle del cilindro en el estado inicial de reposo ($t=0$) con una capa alrededor de partículas trazadoras (color rojo) que van a seguir el movimiento del fluido.

- Caso 1: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 40$.

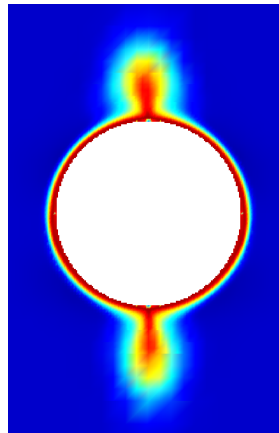


Figura 57: Estado del flujo después de 100 ciclos.

Se puede apreciar el choque del fluido que se mueve dentro de la capa límite en los puntos de eyección dando lugar al chorro eyectado en la dirección de oscilación del flujo. También se aprecia la simetría característica del *Steady Streaming*.

- Caso 2: $\varepsilon = 0,2$ y $R_S = 40$.

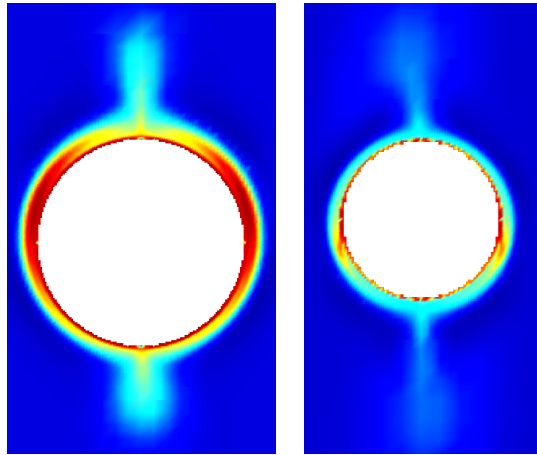


Figura 58: Estado del fluido para el Caso 2 después de 30 ciclos (izquierda) y 100 ciclos respectivamente (derecha)..

Se aprecia claramente el choque del fluido que circula por el interior de la capa límite en los puntos de eyección dando lugar al chorro fluido eyectado con la estructura simétrica típica del fenómeno (cuando el chorro eyectado se alarga se ve difuminado ya que por esa zona el refinamiento de la malla es mucho menor que en los alrededores de la superficie cilíndrica).

- Caso 3: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 160$.

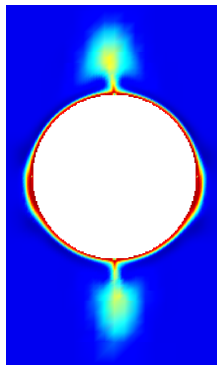


Figura 59: Estado del fluido después de 100 ciclos para el Caso 3.

Se puede apreciar el choque del fluido que transporta la capa límite en los puntos de eyección, dando lugar al característico chorro eyectado en la dirección de oscilación del fluido con estructura simétrica y ver ligeramente la disminución de espesor de la capa límite debido al gran aumento de R_S con respecto a los casos anteriores.

4.2.2. Flujo promediado

- Caso 1: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 40$.

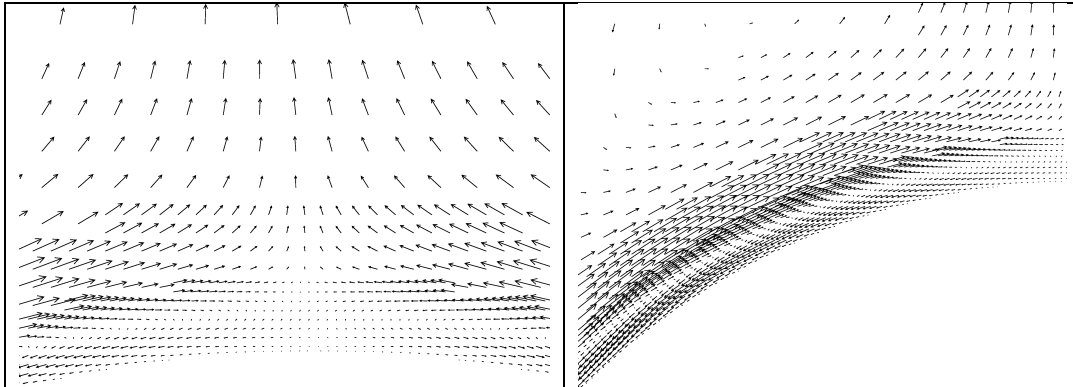


Figura 60: Dos imágenes de la superficie cilíndrica ampliada con vectores de las líneas de corriente después de 100 ciclos promediados para el Caso 1.

Se puede apreciar la recirculación dentro de la capa límite y el choque del fluido que se mueve dentro de la misma en los puntos de eyección dando lugar al chorro eyectado en la dirección de oscilación del flujo con una estructura simétrica.

- Caso 2: $\varepsilon = 0,2$ y $R_S = 40$.

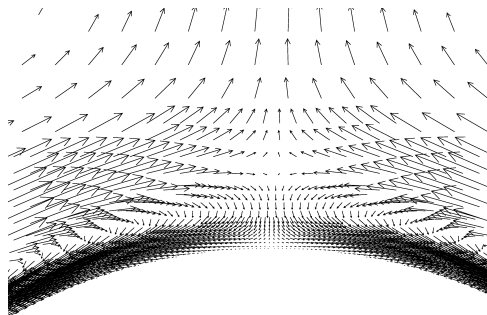


Figura 61: Vectores de las líneas de corriente después de 100 ciclos promediados para el Caso 2.

Se aprecia claramente la recirculación dentro de la capa límite, el choque del fluido que circula por el interior de la misma en los puntos de eyección dando lugar al chorro fluido eyectado simétrico; diferenciándose del caso base anterior (Caso 1) en que hay un mayor número de líneas de corriente en la capa límite, que tiene sentido ya que el valor de ε de este caso es el doble del anterior, y el fluido tiene una mayor velocidad que se traduce en una mayor cantidad de movimiento.

- Caso 3: $\varepsilon = 0,1$ y $R_S = 160$.

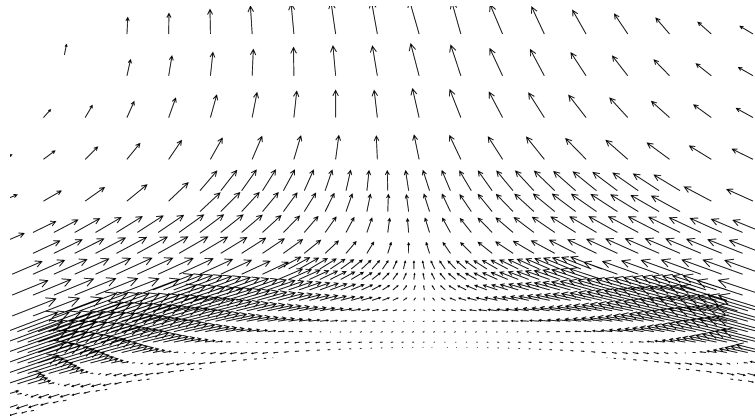


Figura 62: Vectores de las líneas de corriente después de 100 ciclos promediados para el Caso 3.

Se puede apreciar la recirculación dentro de la capa límite, el choque del fluido que transporta esta capa en los puntos de eyección dando lugar al característico chorro eyectado simétrico en la dirección de oscilación del fluido. No se aprecia bien la disminución del espesor de la capa límite que conlleva el gran aumento del valor de R_S respecto a los casos anteriores.

4.3. Comparación Ansys Fluent - Gerris

En el aspecto del mallado, el software ANSYS FLUENT ofrece muchas más posibilidades que el software GERRIS, que realiza un mallado menos eficaz y con menor precisión que el anterior, pero de una manera más sencilla.

Se ha visto como el promedio temporal del flujo es algo sencillo de obtener mediante GERRIS, mientras que para el caso de ANSYS FLUENT es mucho más complejo y laborioso.

En ambos programas se pueden visualizar las características típicas del fenómeno *Steady Streaming* después de haberse simulado un número de ciclos suficiente para que se establezca el fenómeno.

5. Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

Se ha realizado el estudio del fenómeno *Steady Streaming*, resultante del movimiento oscilatorio de un fluido alrededor de un cilindro mediante dos métodos numéricos (ANSYS FLUENT y GERRIS) para $\varepsilon \ll 1$ y $Rs \gg 1$ ($\varepsilon = 0.1, 0.2$ y $Rs = 40, 160$) visualizando las características principales del fenómeno: flujo promediado en el tiempo no nulo, aparición de dos capas fluidas distintas alrededor de la superficie (capa de Stokes y capa límite) con distinto espesor, eyección de chorros en los puntos de eyección y estructura típica simétrica de ocho recirculaciones en las líneas de corriente del flujo promediado.

Se ha cumplido con el principal objetivo del proyecto, ya que se ha demostrado la existencia del *Steady Streaming* y se han podido visualizar sus características principales anteriormente resumidas, mediante los dos métodos numéricos utilizados que son ANSYS FLUENT y GERRIS.

Se ha llegado a obtener un valor aproximado de los espesores de la capa límite para cada caso mediante TecPlot360, siendo muy cercanos estos resultados experimentales a los predichos teóricamente.

Se ha podido contrastar la teoría estudiada variando los parámetros característicos del problema: ε y Rs . Al aumentar Rs se comprueba que disminuye el espesor de la capa límite. Mientras que al aumentar ε se aumenta la velocidad del fluido, traduciéndose en un aumento de la cantidad de movimiento de los chorros eyectados.

El refinado es una parte fundamental de este proyecto, ya que si no se realiza correctamente no se aprecia el fenómeno que estamos tratando, que se da en escalas muy pequeñas de longitud.

Se ha demostrado que la estabilidad del fenómeno depende del tiempo de simulación, ya que, si no se simulan los ciclos suficientes el problema, no se puede apreciar bien el fenómeno y aparece cierta asimetría en el problema. El fenómeno del *Steady Streaming* se ha demostrado que tarda mucho tiempo en establecerse a la perfección, es decir, se necesitarían simular muchos mas ciclos de los simulados en este proyecto para obtener una estructura totalmente simétrica del flujo promediado.

Se llega a la conclusión de que el código comercial ANSYS FLUENT es una herramienta muy válida y útil, al igual que GERRIS, para el estudio de este tipo de problemas oscilatorios. El método empleado para el refinamiento de la malla en ANSYS FLUENT ha permitido visualizar sin problemas el fenómeno, al igual que con GERRIS, aunque con este software se ha conseguido menor precisión en los resultados. Mientras que los resultados han sido mas fáciles de obtener por medio

de GERRIS. Ambos códigos de simulación se pueden usar como alternativas a los experimentos en el laboratorio.

Hasta el momento se han realizado experimentos para valores de $\varepsilon \ll 1$ y $Re \gg 1$ como se ha hecho en este proyecto, aunque nunca particularizando para los valores de ε y Re utilizados en este proyecto para cada caso, por lo que no se puede hacer una comparación rigurosa; pero se han obtenido resultados muy parecidos a los obtenidos por otros autores.

5.2 Líneas futuras de investigación

Hay todavía muchos aspectos que investigar acerca de este fenómeno del *Steady Streaming*. Aparte del estudio aquí realizado, se pueden investigar más soluciones para distintos valores de ε y Re , dar distintos valores a la frecuencia de oscilación de la velocidad del fluido, utilizar otros tipos de software CFD existentes en el mercado y también se podría realizar un estudio tridimensional del fenómeno.

Como se ha comentado en el apartado de Objetivos, este proyecto puede servir como paso previo para la realización del estudio de un flujo oscilatorio alrededor de dos cilindros; variando parámetros como la distancia entre los mismos, sus radios, probando a poner una pared cercana etc.

6. Bibliografía

Wybrow, M.F. & Yan, B. & Riley, N. 1996. *Oscillatory flow over a circular cylinder closet o a plane boundary. Fluid Dynamics Research.* **18**, 269-288.

Hongwei, An & Liang, Cheng & Ming, Zhao. 2010. *Direct numerical simulation of oscillatory flow around a circular cylinder at low Keulegan-Carpenter number. J. Fluid Mech.* **666**, 77-103.

Riley, N. 2001. *Steady Streaming. Annu. Rev. Fluid Mech.* **33**, 43-65.

Holtsmark, J. & Johnsen, I. & Sikkeland, T. & Skavlem, S. 1954. *Boundary layer flow near a cylindrical obstacle in an oscillating, incompressible fluid. The journal of the Acoustical Society of America.* Volume **26**, number 1.

Hongwei, An & Liang, Cheng & Ming, Zhao. 2009. *Steady streaming around a circular cylinder in an oscillatory flow. Ocean Engineering.* **36**, 1089-1097.

Davidson, B.J. & Riley, N. 1972. *Jets induced by oscillatory motion. J. Fluid Mech.* Vol. **53**, part 2, 287-303.

Chang, Eugene.J. & Maxey, Martin.R. 1994. *Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number. Part 1. Oscillatory motion. Journal of Fluid Mechanics.* **277**, 347-379.

7. Anexos

Anexo 1: UDF utilizada en ANSYS FLUENT para simular el movimiento oscilatorio del fluido

```
/*
*****
unsteadybc.c
*****
*/

#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(unsteady_velocity, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) = 0.001*2.0*3.14159265359*sin(2*3.14159265359*t);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

Anexo 2: UDF usada en ANSYS FLUENT para realizar el promedio de velocidades en un ciclo y visualizar las líneas de corriente del flujo promediado

```
/*
*****
avg.c
*****
*/

#include "udf.h"

DEFINE_ON_DEMAND(avg)
{
    Domain *d;
    Thread *t;
    cell_t c;
    FILE *fp;
    int i, t0, iter_no;
    int f_id = 2;
    real a0, a1, a2, a3, a4, a5;
    i = RP_Get_Integer("send");
    iter_no = RP_Get_Integer("data_count");
    d = Get_Domain(1);
    if(i == 1)
    {
        fp = fopen("temp_data", "w");
        thread_loop_c(t, d)
        {
            begin_c_loop(c, t)
            {
                C_UDSI(c, t, 0) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 1) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 2) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 3) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 4) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 5) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 6) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 7) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 8) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 9) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 10) = 0.0;
                C_UDSI(c, t, 11) = 0.0;
            }
        }
    }
}
```

```

        a0 = C_UDSI(c,t,0);
        a1 = C_UDSI(c,t,1);
        a2 = C_UDSI(c,t,2);
        a3 = C_UDSI(c,t,3);
        a4 = C_UDSI(c,t,4);
        a5 = C_UDSI(c,t,5);
        fprintf(fp, "%f %f %f %f %f %f\n",a0, a1, a2, a3, a4, a5);
    }
    end_c_loop(c,t)
}
fclose(fp);
}
else
{
    fp = fopen("temp_data","r");
    thread_loop_c(t,d)
    {
        begin_c_loop(c,t)
        {
            fscanf(fp, "%f %f %f %f %f %f\n",&a0, &a1, &a2, &a3, &a4, &a5);
            C_UDSI(c,t,0) = a0;
            C_UDSI(c,t,1) = a1;
            C_UDSI(c,t,2) = a2;
            C_UDSI(c,t,3) = a3;
            C_UDSI(c,t,4) = a4;
            C_UDSI(c,t,5) = a5;
        }
        end_c_loop(c,t)
    }
    fclose(fp);
}
fp = fopen("temp_data", "w");
thread_loop_c(t,d)
{
    begin_c_loop(c,t)
    {
        C_UDSI(c,t,6) = C_UDSI(c,t,0) + C_U(c,t);
        C_UDSI(c,t,7) = C_UDSI(c,t,1) + C_V(c,t);
        C_UDSI(c,t,8) = C_UDSI(c,t,2) + C_W(c,t);
        C_UDSI(c,t,9) = C_UDSI(c,t,3) + C_P(c,t);
        C_UDSI(c,t,10) = C_UDSI(c,t,4) + C_K(c,t);
        C_UDSI(c,t,11) = C_UDSI(c,t,5) + C_D(c,t);
        fprintf(fp, "%g %g %g %g %g %g\n",C_UDSI(c,t,6), C_UDSI(c,t,7),C_UDSI(c,t,8),
C_UDSI(c,t,9),C_UDSI(c,t,10), C_UDSI(c,t,11));
        if (i == iter_no)
        {
            C_U(c,t) = C_UDSI(c,t,6)/iter_no;
            C_V(c,t) = C_UDSI(c,t,7)/iter_no;
            C_W(c,t) = C_UDSI(c,t,8)/iter_no;
            C_P(c,t) = C_UDSI(c,t,9)/iter_no;
            C_K(c,t) = C_UDSI(c,t,10)/iter_no;
            C_D(c,t) = C_UDSI(c,t,11)/iter_no;
        }
    }
    end_c_loop(c,t)
}
fclose(fp);
}

```

Anexo 3: scm-file correspondiente a la anterior udf

```

(define avg
(lambda (start incr count file-str)
(define i)
(define nu)
(define filename)
(define file-name-end ".dat")
(define cmd-exec "/define/u-d/e-o-d \"avg\" " )
(define cmd-comp-read)
(rp-var-define 'send 1 'integer #f)
(rp-var-define 'data_count count 'integer #f)
(do ((i 1 (+ i 1)))

```



```

(= i (+ count 1)))
(set! nu (+ start (* incr (- i 1))))
(set! filename (string-append file-str (number->string nu) file-name-end))
(display filename)
(set! cmd-comp-read (string-append "/file/r-d" " \"filename \"" " yes "))
(ti-menu-load-string cmd-comp-read)
(rpsetvar 'send i)
(ti-menu-load-string cmd-exec))
))

```

Anexo 4: script utilizado para definir el problema en GERRIS

```

1 0 GfsSimulation GfsBox GfsGEdge {} {

  Global {

    #define pi      3.14159265358979323846

    #define phi      (pi/2.0)
    #define gap      14.0
    #define Rs       40.0
    #define epsilon  0.1

    #define a1       0.06250
    #define ccl      (0.5-0.5*gap*a1-a1)

    #define LEVEL    13

    #define freq     1.0

    #define U0       (2*pi*freq*epsilon*a1)
    #define nu       (epsilon*a1*U0/Rs)

    #define mu       nu

    #define slt      (epsilon*a1/sqrt(Rs))
    #define blt      (a1/sqrt(Rs))

  }

  # 2^(-09) = 0.001953125
  # 2^(-10) = 0.000976562
  # 2^(-11) = 0.000488281
  # 2^(-12) = 0.000244141
  # 2^(-13) = 0.000122070
  # 2^(-14) = 0.000061035

  Time { end = 201.0 dtmax = 0.01 }

  Refine (LEVEL-9)

  Solid ( ellipse(ccl, 0.0, a1, a1) )

  RefineSolid LEVEL

  VariableTracer T

  InitFraction T ({ return ( - difference( ellipse( ccl, 0.0, a1+blt, a1+blt),
                                             ellipse( ccl, 0.0, a1,      a1      ) ) ); })

  Init {} { U = 0.0  V = 0.0 }

  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-0)
} ( (x-ccl)*(x-ccl) + y*y < (1.015625*a1)*(1.015625*a1) )
  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-1)
} ( (x-ccl)*(x-ccl) + y*y < (1.031250*a1)*(1.031250*a1) )
  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-2)
} ( (x-ccl)*(x-ccl) + y*y < (1.062500*a1)*(1.062500*a1) )
  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-3)
} ( (x-ccl)*(x-ccl) + y*y < (1.125000*a1)*(1.125000*a1) )
  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-4)
} ( (x-ccl)*(x-ccl) + y*y < (1.250000*a1)*(1.250000*a1) )

```

```

    AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-5)
  } ( (x-cc1)*(x-cc1) + y*y < (1.500000*a1)*(1.500000*a1) )
  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-6)
  } ( (x-cc1)*(x-cc1) + y*y < (2.000000*a1)*(2.000000*a1) )
  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-7)
  } ( (x-cc1)*(x-cc1) + y*y < (3.000000*a1)*(3.000000*a1) )
  AdaptFunction { istep = 1 } { cmax = 0.01 minlevel = (LEVEL-9) maxlevel = (LEVEL-8)
  } ( (x-cc1)*(x-cc1) + y*y < (5.000000*a1)*(5.000000*a1) )

# AdaptGradient { istep = 1 } { cmax = 0.01 maxlevel = ( (x-cc1)*(x-cc1) + y*y >
4.0*a1*4.0*a1 ? (LEVEL-9) : (LEVEL-2) ) } T

SourceViscosity mu

EventBalance { istep = 100 } 0.1

EventSum { start = 10.0 end = 10.99 step = 0.01 } U Um010
EventSum { start = 10.0 end = 10.99 step = 0.01 } V Vm010
EventSum { start = 10.0 end = 10.99 step = 0.01 } Vorticity vort010

EventSum { start = 20.0 end = 20.99 step = 0.01 } U Um020
EventSum { start = 20.0 end = 20.99 step = 0.01 } V Vm020
EventSum { start = 20.0 end = 20.99 step = 0.01 } Vorticity vort020

EventSum { start = 30.0 end = 30.99 step = 0.01 } U Um030
EventSum { start = 30.0 end = 30.99 step = 0.01 } V Vm030
EventSum { start = 30.0 end = 30.99 step = 0.01 } Vorticity vort030

EventSum { start = 100.0 end = 100.99 step = 0.01 } U Um100
EventSum { start = 100.0 end = 100.99 step = 0.01 } V Vm100
EventSum { start = 100.0 end = 100.99 step = 0.01 } Vorticity vort100

EventSum { start = 200.0 end = 200.99 step = 0.01 } U Um200
EventSum { start = 200.0 end = 200.99 step = 0.01 } V Vm200
EventSum { start = 200.0 end = 200.99 step = 0.01 } Vorticity vort200

OutputTime { istep = 1 } log.out
OutputProjectionStats { istep = 1 } log.out
OutputTiming { istep = 100 } log.out

OutputSimulation { step = 1.00 } ss---%010.5f.gfs { }

# OutputPPM { step = 1.00 } vort---%010.5f.ppm { min = -10.00 max = 10.00 v =
Vorticity maxlevel = 12 }
# OutputPPM { step = 1.00 } T1---%010.5f.ppm { min = 0.00 max = 1.00 v = T
maxlevel = 12 }
# OutputPPM { step = 1.00 } T2---%010.5f.ppm { min = 0.00 max = 0.30 v = T
maxlevel = 12 }
# OutputPPM { step = 1.00 } T3---%010.5f.ppm { min = 0.00 max = 0.10 v = T
maxlevel = 12 }

# OutputPPM { step = 0.05 } { ppm2mpeg > T1.mpg } { min = 0.00 max = 1.00 v = T
maxlevel = 12 condition = ( x > 0.00 && x < 0.50 && y > -0.25 && y < 0.25 ) }
OutputPPM { step = 0.05 } { ppm2mpeg > T1.mpg } { min = 0.00 max = 1.00 v = T
maxlevel = 12 condition = ( x > -0.25 && x < 0.25 && y > -0.25 && y < 0.25 ) }

OutputLocation { istep = 1 } atlowerbnd 0.000 -0.499 0.0
OutputLocation { istep = 1 } atupperbnd 0.000 0.499 0.0
OutputLocation { istep = 1 } atleftbnd -0.499 0.000 0.0
OutputLocation { istep = 1 } atrightbnd 0.499 0.000 0.0

OutputSimulation { start = 11.0 } simulationsum010.gfs { variables =
Um010,Vm010,vort010 }
OutputSimulation { start = 21.0 } simulationsum020.gfs { variables =
Um020,Vm020,vort020 }
OutputSimulation { start = 31.0 } simulationsum030.gfs { variables =
Um030,Vm030,vort030 }
OutputSimulation { start = 101.0 } simulationsum100.gfs { variables =
Um100,Vm100,vort100 }
OutputSimulation { start = 201.0 } simulationsum200.gfs { variables =
Um200,Vm200,vort200 }

}

GfsBox {
  top = Boundary { BcDirichlet U U0*sin(2*pi*freq*t)*cos(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-
4.0))) BcDirichlet V U0*sin(2*pi*freq*t)*sin(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-4.0))) }

```

```

    bottom = Boundary { BcDirichlet U U0*sin(2*pi*freq*t)*cos(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-
4.0))) BcDirichlet V U0*sin(2*pi*freq*t)*sin(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-4.0))) }
    left   = Boundary { BcDirichlet U U0*sin(2*pi*freq*t)*cos(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-
4.0))) BcDirichlet V U0*sin(2*pi*freq*t)*sin(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-4.0))) }
    right  = Boundary { BcDirichlet U U0*sin(2*pi*freq*t)*cos(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-
4.0))) BcDirichlet V U0*sin(2*pi*freq*t)*sin(phi)*0.5*(1.0+tanh(0.125*(t-4.0))) }
}

```